



Tomás Lázaro Rantanen

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Influência da variabilidade das propriedades do solo na estabilidade de túneis superficiais em maciços respondendo em condições não drenadas.

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil - Perfil de Geotecnia

Orientador: Professor Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão, Professor Associado,
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Professor Doutor Daniel Aelenei
Arguente: Professor Doutor Pedro Fernando e Mota Guedes de Melo
Vogal: Professor Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2016

Influência da variabilidade das propriedades do solo na estabilidade de túneis superficiais em maciços respondendo em condições não drenadas.

Copyright © Tomás Lázaro Rantanen, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Ao meu futuro.

Agradecimentos

Quero aqui expressar a minha gratidão ao meu orientador científico, Professor Doutor Armando Antão. Sem a sua supervisão e aconselhamento este trabalho não teria sido possível. O seu conhecimento é extraordinário e sinto-me privilegiado por ter tido esta oportunidade.

Quero agradecer a todos os membros do júri, Professor Doutor Pedro Fernando e Mota Guedes de Melo e Professor Doutor Daniel Aelenei pelo tempo dispendido na análise da presente dissertação e também pelos seus comentários que contribuíram para a qualidade deste trabalho.

A todos os meus professores quero agradecer pela transmissão de conhecimentos e oportunidades abertas.

Quero agradecer ao grupo de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa por terem despoletado o meu interesse pela área da Engenharia Geotécnica. Quero também agradecer a permissão para a utilização da plataforma computacional *Geocluster* pelo seu poder de cálculo que tornou este trabalho possível.

Ao Nuno Deusdado quero expressar a minha gratidão por ter feito parte da equipa que desenvolveu o programa *Mechpy* e pelo apoio quando foi necessário.

Quero também expressar a minha gratidão pelo serviço de empréstimo interbibliotecas, EIB, da biblioteca da FCT/UNL. Este serviço facilita e adiciona grandes mais-valias na pesquisa bibliográfica para trabalhos de dissertação e investigação.

Por fim quero agradecer aos meus amigos e família pela presença e pelo apoio. Quero agradecer em especial ao Frederico Oliveira, Manuel Arriaga, António Mesquita, Diogo Oliveira, David Henriques, David Costa, Joana Chaves, Diogo Pinto, Rita Vieira, Luís Viotto, Francisco Franco, Alexandra Amaro e Dione Guimarães; à minha família, pais e irmãs; e à Mariana Cerveira por estar ao meu lado.

Resumo

O presente trabalho pretende avaliar a estabilidade de uma escavação de um túnel superficial inserido num maciço que responde em condições não drenadas e que é caracterizado pela variabilidade inerente das propriedades do mesmo. A resistência do solo é modelada como um campo aleatório. Para tal, é utilizada para a sua caracterização uma função de distribuição log-normal e uma função de autocorrelação. Separando estas funções pelas suas componentes, o solo é então modelado pelos parâmetros de média, coeficiente de variação e coeficiente de correlação espacial. É utilizado o método do Hipercubo Latino para a simulação do problema e para a determinação da capacidade resistente do solo o programa **Mechpy** com a sua capacidade de resolver problemas de análise limite.

Estuda-se, no trabalho um modelo bidimensional de um túnel superficial, onde se aplica à superfície um carga distribuída e a variabilidade das propriedades do solo se caracteriza por uma estrutura de correlação isotrópica.

Numa primeira fase pretende-se avaliar a influência da malha estatística e do valor da correlação espacial das propriedades de resistência do solo sobre a estabilidade do túnel.

A segunda fase do estudo pretende avaliar a influência da profundidade do túnel, do coeficiente de variação da propriedade de resistência do solo e do coeficiente de correlação espacial.

Palavras-chave: Túneis Superficiais, Variabilidade do Solo, Análise Limite, Teorema Cinemático, Teorema Estático, Hipercubo Latino.

Abstract

The presented work aims to evaluate the soil stability of a shallow tunnel excavation. The material in which it is inserted has an undrained response to the loading at the surface and it's characterized by the inherent variability of its properties. The resistance properties of the soil are modeled as a random field. To do so it is used a log-normal distribution function and a autocorrelation function. Such functions are described by the parameters of average, coefficient of variability and coefficient of spatial correlation, both horizontal and vertical. The Latin Hypercube was the chosen method of simulation for the problem and the program Mechpy was used for the determination of the soil bearing capacity by its limit analysis capability.

The first approach to the issue at hand was materialized by a bi-dimensional model which consists of tunnel excavation at shallow depth, where it is applied at the surface a distributed loading and where the soil is characterized by an isotropic correlation structure. This approach aims to evaluate the influence of the statistical mesh and the spatial correlation of the soil properties for the problem.

The second stage of this study is to evaluate the influence of the tunnel's depth, it's coefficient of variability and the coefficient of spatial correlation.

Keywords: Shallow Tunnel, Soil Variability, Limit Analysis, Kinematic Theorem, Static Theorem, Latin Hypercube

Conteúdo

Lista de Figuras	xv
------------------	----

Lista de Tabelas	xxi
------------------	-----

1	Introdução	1
1.1	Considerações gerais	1
1.1.1	Enquadramento	1
1.1.2	Objetivos e metodologia	2
1.1.3	Organização do documento	2
1.2	Condições de realização do estudo	3
1.2.1	Características mecânicas do solo	3
1.2.2	Definição do problema estudado	4
1.3	Modelação Numérica da Carga de Colapso	6
1.3.1	Análise limite	6
1.4	Metodologias de cálculo - Programas computacionais	9
1.4.1	Gmsh	9
1.4.2	P2D	9
1.4.3	MechpyConvert	9
1.4.4	MechpyRun	10
1.4.5	Paraview	10
2	Modelação da Variabilidade Espacial do Solo	11
2.1	Introdução	11
2.2	Caracterização da variabilidade espacial do solo	12
2.2.1	Caracterização estatística das propriedades do solo	12
2.2.2	Teoria dos campos aleatórios	13
2.2.3	Adequabilidade das distribuições estatísticas das propriedades geotécnicas	14
2.2.4	Estimativas de medidas estatísticas das propriedades do solo	14
2.3	Métodos de simulação de variabilidade espacial do solo	15
2.3.1	Método do Hipercubo Latino	15
2.4	Metodologia de aplicação da variabilidade inerente do solo ao modelo	17

3	Influência da malha estatística	19
3.1	Influência da malha de elementos finitos	19
3.1.1	Estudo do modelo de solo homogêneo	20
3.2	Dimensão dos elementos da malha estatística	21
3.3	Concordância dimensional	23
3.4	Estudo da influência da malha estatística	24
3.5	Influência da distância de correlação espacial	25
3.6	Conclusões do capítulo	26
4	Estudo da influência dos parâmetros geométricos e de resistência no problema da estabilidade dos túneis	29
4.1	Introdução	29
4.2	Resultados	30
4.2.1	Análise dos resultados	45
4.3	Conclusões do capítulo	45
5	Conclusão	47
5.1	Considerações finais	47
5.2	Desenvolvimentos futuros	48
	Bibliografia	49
A	Modelação Numérica de Túneis Superficiais	51
B	Influência da malha estatística	55
B.1	Malhas estatísticas estudadas	55
B.2	Estrutura de correlação espacial	59
C	Estudo da influência dos parâmetros geométricos e de resistência no problema da estabilidade dos túneis	63
C.1	Tabelas de resultados	63
C.2	Representação gráfica dos resultados	68
C.3	Visualização da distribuição das propriedades de resistência e do mecanismo de colapso	84

Lista de Figuras

1.1	Representação esquemática de construção	4
1.2	Definição do carregamento	5
1.3	Exemplo de mecanismo de colapso local	6
2.1	Variabilidade inerente do solo Phoon e Kulhawy (1999)	12
3.1	Estudo da influência da malha de elementos finitos em $C/D = 1$	20
3.2	Evolução dos valores médios do número de estabilidade do modelo homogêneo com a profundidade.	21
3.3	Malhas estatísticas estudadas à profundidade $C/D = 1$	23
3.4	Exemplo mostrando a importância da escolha e concordância entre a malha estatística e a malha de elementos finitos para a atribuição das propriedades de resistência	24
3.5	Evolução do valor médio do número de estabilidade em função do valor de Θ_{c_u} para $\gamma D/c_u = 0$ com $CV_{c_u} = 4$, para as quatro malhas estatísticas estudadas.	25
3.6	Evolução do valor do desvio-padrão em função do valor de Θ_{c_u} para $\gamma D/c_u = 0$ com $CV_{c_u} = 4$, para as quatro malhas estatísticas estudadas.	25
3.7	Influência da distância de correlação Θ_{c_u} na distribuição da resistência ao corte não drenada à profundidade $C/D = 1$ para $CV_{c_u} = 4$ para a malha 24×10	26
3.8	Mecanismos de colapso à profundidade $C/D = 1$ para $CV_{c_u} = 4$ para as distribuições apresentadas da Figura 3.7	26
4.1	Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$	31
4.2	Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	32
4.3	Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	32
4.4	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	33
4.5	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	33

4.6	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	33
4.7	Exemplo de distribuição da resist\ancia ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$	34
4.8	Evolução dos valores m\edios do número de estabilidade para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	35
4.9	Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	35
4.10	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	36
4.11	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	36
4.12	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	36
4.13	Exemplo de distribuição da resist\ancia ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$	38
4.14	Evolução dos valores m\edios do número de estabilidade para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	39
4.15	Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	39
4.16	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	39
4.17	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	40
4.18	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	40
4.19	Exemplo de distribuição da resist\ancia ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$	42
4.20	Evolução dos valores m\edios do número de estabilidade para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	43
4.21	Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	43
4.22	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	43
4.23	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	44
4.24	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	44

4.25	Evolução dos valores médios do número de estabilidade para o modelo homogêneo e o modelo considerando uma estrutura de correlação isotrópica em função de $C/D = \{1; 2; 3; 4\}$ para $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\gamma D/c_u = 0$ e $\Theta_{c_u} = 0, 125$	45
A.1	Malha de elementos finitos do modelo bidimensional na profundidade $C/D = 1$	51
A.2	Malha de elementos finitos do modelo bidimensional na profundidade $C/D = 2$	52
A.3	Malha de elementos finitos do modelo bidimensional na profundidade $C/D = 3$	52
A.4	Malha de elementos finitos do modelo bidimensional na profundidade $C/D = 4$	53
B.1	Malhas estatísticas estudadas à profundidade $C/D = 1$	55
B.2	Malhas estatísticas estudadas à profundidade $C/D = 2$	56
B.3	Malhas estatísticas estudadas à profundidade $C/D = 3$	56
B.4	Malhas estatísticas estudadas à profundidade $C/D = 4$	57
B.5	Malhas estatísticas estudadas à profundidade $C/D = 5$	58
B.6	Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 4$ correspondentes à malha estatística $24D \times 10D$	60
B.7	Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 3$ e $CV_{c_u} = 4$ correspondentes à malha estatística $24D \times 10D$	61
C.1	Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	68
C.2	Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	68
C.3	Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	69
C.4	Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	69
C.5	Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	69
C.6	Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	70
C.7	Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	70
C.8	Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	71

C.9	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 1, \gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	71
C.10	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 1, \gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	71
C.11	Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 2, \gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	72
C.12	Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 2, \gamma D/c_u = 0, CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	72
C.13	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 2, \gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	73
C.14	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 2, \gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	73
C.15	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 2, \gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	73
C.16	Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 2, \gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	74
C.17	Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 2, \gamma D/c_u = 1, CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	74
C.18	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 2, \gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	75
C.19	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 2, \gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	75
C.20	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 2, \gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	75
C.21	Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 3, \gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	76
C.22	Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 3, \gamma D/c_u = 0, CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	76
C.23	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 3, \gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	77
C.24	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 3, \gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	77
C.25	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 3, \gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	77
C.26	Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 3, \gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	78
C.27	Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 3, \gamma D/c_u = 1, CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	78
C.28	Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 3, \gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	79

C.29 Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	79
C.30 Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	79
C.31 Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	80
C.32 Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} =$ $\{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	80
C.33 Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	81
C.34 Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	81
C.35 Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	81
C.36 Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	82
C.37 Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} =$ $\{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2\}$	82
C.38 Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	83
C.39 Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	83
C.40 Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$	83
C.41 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo me- canismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0, 125$	84
C.42 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo me- canismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0, 25$	85
C.43 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo me- canismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0, 5$	86
C.44 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo me- canismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 1$	87
C.45 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo me- canismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 2$	88
C.46 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo me- canismo de colapso para a profundidade $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0, 125$	90
C.47 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo me- canismo de colapso para a profundidade $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0, 25$	91
C.48 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo me- canismo de colapso para a profundidade $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0, 5$	92

C.49 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 1$. . .	93
C.50 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 2$. . .	94
C.51 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,125$. . .	96
C.52 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,25$. . .	97
C.53 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,5$. . .	98
C.54 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 1$. . .	99
C.55 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 2$. . .	100
C.56 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,125$. . .	102
C.57 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,25$. . .	103
C.58 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,5$. . .	104
C.59 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 1$. . .	105
C.60 Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 2$. . .	106

Lista de Tabelas

2.1	Recolha bibliográfica de coeficientes de variação de propriedades do solo . .	15
3.1	Influência da dimensão dos elementos finitos no número de estabilidade para as profundidades $C/D = 1$	20
3.2	Limite superior do número de estabilidade para o modelo homogéneo da malha $s = 0,1$ nas diferentes profundidades estudadas.	20
3.3	Malhas estatísticas bidimensionais estudadas na Profundidade $C/D=1$	22
3.4	Dimensão dos elementos quadrangulares das malhas estatísticas estudadas .	22
3.5	Dimensões dos elementos das malhas estatísticas em função de Θ_{c_u}	26
4.1	Número de elementos das malhas estatísticas e correspondente dimensão dos elementos em função de Θ_{c_u} e C/D	30
4.2	Evolução do número de estabilidade médio para $C/D = \{1;2;3;4\}$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ com $\gamma D/c_u = 0$ e $\Theta_{c_u} = 0,125$	45
C.1	$C/D=1$	64
C.2	$C/D=2$	65
C.3	$C/D=3$	66
C.4	$C/D=4$	67

Glossário

Abreviaturas

FS - Coeficiente de segurança global

C - Altura de recobrimento do túnel

D - Diâmetro do túnel

Maiúsculas Latinas

W_e - Trabalho das forças exteriores aplicadas

S - Número de divisões no diâmetro do túnel

$\text{Var}[X]$ - Variância da variável aleatória X

$E[X]$ - Valor médio da variável X

S - Matriz com dimensões $N \times K$ com as coordenadas de cada amostra no espaço de probabilidades

P - Matriz com dimensões $N \times K$ em que cada uma das suas K colunas é uma permutação aleatória dos valores 1 e N

R - Matriz com dimensões $N \times K$ constituída por valores aleatórios entre 0 e 1

N - Número de amostras

\tilde{L} - Matriz triangular inferior

Y - Matriz com dimensões $N \times K$

Y* - Nova matriz com dimensões $N \times K$

Minúsculas Latinas

c_u - Resistência ao corte não drenada do solo

s - Dimensão dos elementos da malha de elementos finitos

z - Profundidade a partir da superfície do terreno

$t(z)$ - valor da tendência determinística

$w(z)$ - Variação residual da propriedade do solo

b - Forças de massa constantes por unidade de volume afectadas por um multiplicador

t - Tensões aplicadas na fronteira afectadas por um multiplicador

u - Campo de deslocamentos

\dot{u} - Campo de velocidades

Maiúsculas Gregas

Θ - Correlação espacial da resistência ao corte não drenada

Ω - Volume do corpo

Γ - Superfície do corpo

Minúsculas Gregas

τ - Tensão de corte tangencial

σ_s - Carga uniforme distribuída à superfície

σ_t - Carga uniforme distribuída segundo a normal à superfície interior do túnel

γ - Peso volúmico

$\xi(z)$ - Propriedade do solo variável em profundidade

ϵ - Campo de deformações

$\dot{\epsilon}$ - Campo da taxa de deformações plásticas

θ - Distância de correlação espacial

θ_{c_u} - Distância de correlação espacial da resistência ao corte não drenada

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações gerais

1.1.1 Enquadramento

A procura de soluções no espaço subterrâneo é cada vez mais frequente para os problemas que surgem com o aumento de população e, conseqüentemente, com o aumento de tráfego à superfície e aumento das necessidades populacionais. Desde problemas de congestionamento a problemas de distribuição de bens essenciais, a solução mais evidente aponta para a construção em profundidade, já que, o espaço subterrâneo é, salvo algumas exceções, ainda um espaço acessível, pouco explorado e aproveitado .

Pela premissa acima apresentada, as obras subterrâneas serão, no futuro próximo, mais frequentes, pelo que se pretende que o seu projeto e dimensionamento seja mais realista, não apenas para uma maior qualidade em relação a estas obras mas também para a sua otimização económica.

A construção de túneis envolve diretamente a geotecnia, como ramo da engenharia civil que estuda os geomateriais. Uma das características que distingue a geotecnia dos outros ramos da engenharia civil é a variabilidade inerente das características dos materiais que constituem os solos e maciços rochosos. Nos estudos correntes de problemas e projetos geotécnicos a sua variabilidade geralmente não é considerada.

Na maior parte dos casos dos problemas geotécnicos recorre-se a análises determinísticas, admitindo a hipótese de solo homogêneo e isotrópico. Para evolução deste ramo da engenharia civil pretende-se que sejam mitigadas as fontes de incerteza geotécnica inerentes associadas.

Os efeitos resultantes da variabilidade inerente das propriedades do solo na estabilidade de túneis superficiais serão o alvo do presente trabalho. Proceder-se-à introdução

da análise estatística na modelação computacional da variação das propriedades de resistência do solo e à utilização da análise limite para o estudo do intervalo em que se encontra o valor do número de estabilidade.

1.1.2 Objetivos e metodologia

Neste trabalho vai ser estudada a escavação de túneis circulares em maciço terroso respondendo em condições não drenadas.

O estudo tem o objetivo de avaliar a influência da variabilidade inerente do solo na estabilidade de túneis. Para tal utiliza-se a aproximação das cargas de colapso através dos teoremas cinemático e estático da análise limite considerando o estado plano de deformação. Este estado de deformação ignora quaisquer deformações e deslocamentos na direção do eixo do túnel.

O caso escolhido para este estudo analisa apenas a secção transversal de túnel circular único. Visto estar a ser avaliada a influência da variação das características de resistência do maciço terroso no espaço, não se pode definir um eixo de simetria como forma de simplificação do problema com a consequente diminuição do tempo necessário para realização do cálculo.

Pretende-se aprofundar o conhecimento sobre a influência da variabilidade inerente do solo na quantificação do número de estabilidade e do mecanismo de colapso da estrutura subterrânea face ao mesmo estudo considerando o solo homogêneo e isotrópico.

Revela-se o interesse neste tema por se encontrar na literatura vários estudos de análise limite que avaliam a influência da variação das propriedades de um maciço na estabilidade de fundações superficiais, na percolação e em assentamentos superficiais de túneis. No entanto, o trabalho que se propõe, explora um tema relevante no ramo da engenharia geotécnica e não foi encontrado na literatura nenhum que aborde este tipo de análise.

Apresentam-se vários casos de estudo bidimensionais, onde se avalia a influência (i) da malha estatística, (ii) dos parâmetros que caracterizam probabilisticamente a heterogeneidade das características de resistência do solo, (iii) da estrutura de correlação espacial das características de resistência do solo e (iv) dos parâmetros geométricos.

1.1.3 Organização do documento

O presente documento encontra-se dividido em seis capítulos. Neste capítulo, Capítulo 1, encontram-se revistas as características mecânicas do solo respondendo em condições

não drenadas e são introduzidos os parâmetros geométricos que definem a geometria do modelo do túnel estudado. Ainda neste capítulo encontra-se descrita a teoria da análise limite e a metodologia de cálculo implementada no estudo.

No Capítulo 2 são apresentadas as principais fontes de incerteza geotécnica e descrita a caracterização da variabilidade espacial do solo. Aborda-se de uma forma sucinta a teoria dos campos aleatórios visto que o tema não é objeto de estudo desta dissertação. São apresentados os valores esperados para o coeficiente de variabilidade com recurso a uma extensa pesquisa bibliográfica realizada por Phoon e Kulhawy (1999). Por fim é descrito o método de distribuição espacial das propriedades do solo, sendo este o método do Hipercubo Latino. É também descrito o método de aplicação dos parâmetros da variabilidade do solo ao modelo.

No Capítulo 3 é estudada a influência da malha de elementos finitos e a malha estatística nos resultados do número de estabilidade para posteriormente se poder escolher uma malha que se adeque ao estudo presente no capítulo seguinte.

No Capítulo 4 é avaliada a influência dos parâmetros de caracterização da variabilidade geotécnica na estabilidade do túnel, bem como a influência da profundidade.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo realizado nesta dissertação. São também apresentados possíveis desenvolvimentos futuros a esta investigação.

1.2 Condições de realização do estudo

1.2.1 Características mecânicas do solo

O estudo efectuado tem por objetivo a avaliação da resposta do maciço considerando o corpo de solo não drenado. A chamada resistência ao corte não drenada é definida pelo critério de Tresca:

$$\tau \leq c_u \quad (1.1)$$

onde c_u representa a resistência ao corte não drenada do solo.

Para o caso de o valor de c_u variar em profundidade, tem-se que a equação para este adota usualmente a forma,

$$c_u(z) = c_{u,0} + \rho \cdot z \quad \text{onde} \quad \rho = \frac{dc_u}{dz} \quad (1.2)$$

onde $c_{u,0}$ representa a resistência não drenada do solo à superfície do terreno e ρ a variação desta resistência com a profundidade. No entanto não será introduzida no estudo a variação da resistência do solo em profundidade.

Neste estudo apenas se avalia a resposta de túneis superficiais respondendo em condições não drenadas, pelo que as análises realizadas são efetuadas em tensões totais.

1.2.2 Definição do problema estudado

1.2.2.1 Geometria

Apresenta-se esquematicamente na Figura 1.1, a geometria e os carregamentos associados à escavação de túneis em solos. Representa-se por C a altura de recobrimento do túnel, D o diâmetro do túnel e P o comprimento do troço não revestido. Apesar da escavação de túneis ser um problema tridimensional, neste trabalho não se estudou a influência do comprimento não revestido do túnel visto o objetivo deste trabalho não ser a avaliação da influência destes parâmetros.

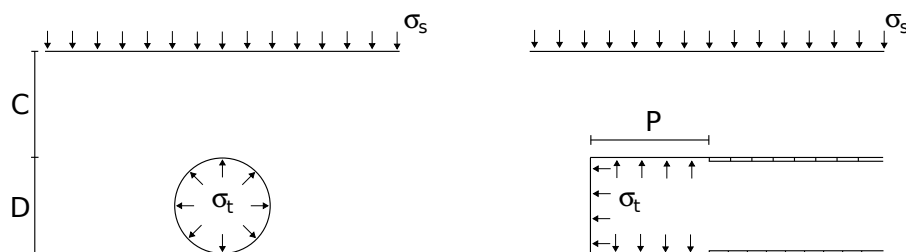


Figura 1.1: Representação esquemática de construção

Os parâmetros geométricos do problema em análise são descritos no ponto acima, no entanto, é de referir que apenas são considerados para o estudo a variação de uma das três características geométricas do problema sendo essa o recobrimento (C). O diâmetro (D) será considerado unitário e o comprimento não revestido do túnel, $P = \infty$, o que corresponde na prática a um túnel infinito não revestido.

É frequente tratar os problemas de execução de túneis de forma adimensional no sentido em que a profundidade relativa do túnel pode ser descrita como a relação entre o seu recobrimento e o seu diâmetro, tomando a forma de C/D . Por esta ordem de ideias quanto maior esta relação, maior a profundidade relativa a que o túnel se encontra. A relação C/D toma para este estudo os valores de 1, 2, 3 e 4.

1.2.2.2 Domínio

O maciço onde se insere a escavação do túnel é modelado com as dimensões de $10D \times 4D$, $10D \times 5D$, $10D \times 6D$, $10D \times 7D$ e $10D \times 8D$, estas representando as dimensões horizontais e verticais, respetivamente. D representa o diâmetro do túnel.

As condições de deslocamentos consistem na restrição destes na base e nas fronteiras laterais.

1.2.2.3 Condições de carregamento

O carregamento é materializado por σ_s , σ_t e γ e representam respetivamente a carga uniforme distribuída à superfície, a carga uniforme distribuída segundo a normal à superfície interior do túnel e o peso volúmico do solo.

Nesta análise, o carregamento do maciço devido ao peso volúmico apresenta-se sob relação $\frac{\gamma D}{c_{u,0}}$ e toma os valores de 0 e 1.

As tensões σ_s e σ_t apresentam-se frequentemente na literatura pela sua diferença ($\sigma_s - \sigma_t$) devido ao comportamento incompressível do solo em condições não drenadas.

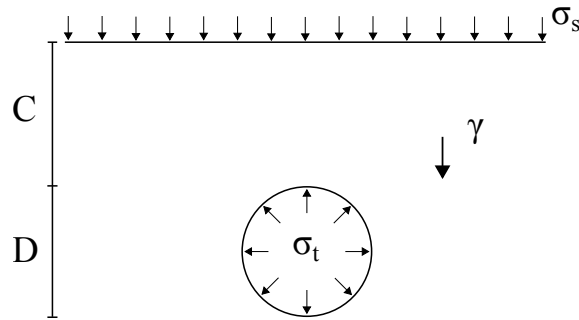


Figura 1.2: Definição do carregamento

Do ponto de vista dos resultados, estes são usualmente apresentados como a diferença ($\sigma_s - \sigma_t$) ou como o número de estabilidade inspirado no proposto por Broms e Bennermark (1967),

$$N = \frac{\sigma_s - \sigma_t}{c_{u,0}} + \frac{\gamma D}{c_{u,0}} \left(\frac{C}{D} + \frac{1}{2} \right) \quad (1.3)$$

1.2.2.4 Formas de Colapso

Existem diversos fatores que podem influenciar a estabilidade dos túneis, no sentido do aumento da estabilidade ou no sentido da sua diminuição. Os fatores que levam à criação

de condições para um aumento ou diminuição de estabilidade podem ser endógenos ou exógenos.

Consideram-se fatores endógenos aqueles que resultam das propriedades do maciço ou de qualquer outro fator natural; e exógenos aqueles que resultam da ação humana.

As formas de colapso que podem ocorrer são, globalmente, duas e localmente, uma. São respetivamente, o colapso por intrusão e por explosão, formas de colapso global, e o destacamento de blocos e massas de solo significativas, formas de colapso local.

O colapso por intrusão é a forma de colapso mais frequente e dá-se quando a pressão no interior do túnel não é suficiente para se verificar a estabilidade do túnel, então verifica-se um movimento do maciço no sentido de ocupação do espaço livre criado pela escavação do túnel. O colapso por explosão verifica-se quando a pressão no interior do túnel atinge valores de tal forma elevados que o maciço se desloca no sentido ascendente.

O colapso local, exemplificado pela Figura 1.3, ocorre quando na face de escavação do túnel se dá origem ao deslizamento de uma massa de solo.

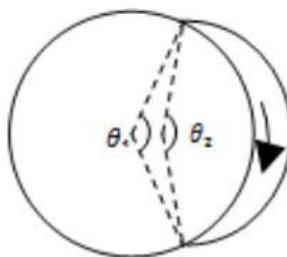


Figura 1.3: Exemplo de mecanismo de colapso local

O túnel é garantido como estável se não ocorrer nenhum dos casos acima mencionados, para umas dadas condições de geometria, de carregamento e resistência do maciço.

1.3 Modelação Numérica da Carga de Colapso

1.3.1 Análise limite

A análise limite estuda a determinação das cargas de colapso de sistemas mecânicos utilizando principalmente dois teoremas da teoria do colapso plástico que resultam em soluções ditas de limite superior e limite inferior, onde a solução de colapso se encontra

no respetivo intervalo obtido. Se o resultado obtido pelos dois teoremas for igual então pode-se dizer que se encontrou a solução exata da carga de colapso do sistema. A aplicação destes teoremas necessita que o material seja perfeitamente plástico e que tenha a lei de fluxo associada. (Wood 2004)

Um carregamento admissível, é um carregamento onde se pode obter uma distribuição de tensões equilibradas para as quais seja respeitada a condição de cedência no seu domínio. Uma distribuição de tensões equilibrada, é um campo de tensões em que são não só respeitadas as condições de equilíbrio no domínio mas também nas fronteiras estáticas. O colapso de um sistema mecânico, em que o material exiba um comportamento perfeitamente plástico, dá-se quando este atinge o carregamento limite. Originam-se para este carregamento, deformações plásticas incontroláveis no maciço. (Silva 2009)

É possível ignorar algumas das condições de equilíbrio e de compatibilidade, com vista a simplificar o cálculo e obter soluções.

A solução obtida quando o solo é carregado até ao limite onde origina um mecanismo de rotura, é a força mínima necessária para o colapso do sistema. O sistema colapsa pelo mecanismo de rotura onde é minimizada a força aplicada. A solução obtida por este método pertence ao limite superior. (Wood 2004)

A solução obtida quando o solo é carregado até ao limite onde não origina um mecanismo de rotura, é a força máxima que se pode aplicar para o não colapso do sistema. O sistema procura uma distribuição de tensões onde é maximizada a capacidade resistente do solo. A solução obtida por este método pertence ao limite inferior. (Wood 2004)

1.3.1.1 Teorema cinemático ou da região superior

O teorema cinemático afirma que se para um determinado conjunto de forças exteriores, existe um mecanismo de colapso compatível e onde o trabalho das forças exteriores aplicadas,

$$W_e = \int_{\Omega} \mathbf{b} \cdot \mathbf{u}^* d\Omega + \int_{\sigma} \mathbf{t} \cdot \mathbf{u}^* d\Gamma \quad (1.4)$$

onde \mathbf{b} e \mathbf{t} representam, respectivamente, as forças de massa constantes por unidade de volume afectadas por um multiplicador e as tensões aplicadas na fronteira afectadas por

um multiplicador e u^* o campo de deslocamentos, seja superior ou igual ao trabalho plástico total dissipado,

$$W_D = \int_{\Omega} D(e^*) d\Omega \quad (1.5)$$

onde $D(e^*)$ representa a energia dissipada por unidade de volume, então o carregamento causa o colapso da estrutura.

O campo de velocidades compatível expresso no trabalho das forças exteriores aplicadas só o é se, este respeitar as condições de compatibilidade na fronteira cinemática,

$$\dot{u} = 0 \quad em \quad \Gamma_u \quad (1.6)$$

e se o campo da taxa de deformações associado pelas condições de compatibilidade,

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{ij} + \dot{u}_{ji}) \quad (1.7)$$

respeite a regra de escoamento associado,

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \alpha \frac{\partial \Phi(\sigma)}{\partial \sigma_{ij}}, \quad \alpha \in \mathbb{R}_0^+ \quad (1.8)$$

1.3.1.2 Teorema estático ou da região inferior

O teorema estático afirma que, se para um determinado conjunto de forças exteriores, estas estão em equilíbrio com as tensões internas (distribuição de tensões estaticamente admissível),

$$\sigma \cdot n = t, \quad em \quad \Gamma_{\sigma} \quad (1.9)$$

$$\sigma_{i,ij} + b_j = 0, \quad em \quad \Omega \quad (1.10)$$

não violando o critério de rotura,

$$f(\sigma) \leq 0 \quad (1.11)$$

então as forças exteriores atuantes não causam o colapso.

1.4 Metodologias de cálculo - Programas computacionais

A modelação do problema em análise foi feita recorrendo a programas computacionais com funções distintas. Estes são: **Gmsh**, **P2d**, **MechpyConvert**, **MechpyRun** e **Paraview**.

1.4.1 Gmsh

O programa **Gmsh** permite definir a geometria do problema, a forma e dimensão da malha de elementos finitos.

1.4.2 P2D

O programa **P2d** implementa o método do Hipercubo Latino. Este programa, como se poderá ver nos próximos capítulos deste estudo, permite a criação de uma malha estatística do domínio do modelo onde são atribuídas diferentes propriedades a cada elemento dessa malha, simulando assim um maciço de solo heterogéneo. Para o funcionamento do programa são introduzidas as coordenadas do domínio e as propriedades estatísticas do solo.

1.4.3 MechpyConvert

Recorrendo ao programa **MechpyConvert**, este converte o ficheiro criado pelo programa **Gmsh** num formato capaz de ser lido pelo programa **MechpyRun**. No processo de conversão são definidos os carregamentos, a superfícies onde estes atuam, os graus de liberdade das superfícies de fronteira, as características do material e o critério de resistência do material.

1.4.4 **MechpyRun**

O programa **MechpyRun** permite a simulação do carregamento e obtenção dos resultados do problema em análise. Este programa corre o ficheiro convertido e emite dois ficheiros. O primeiro ficheiro mostra o valor do multiplicador da carga de colapso obtido entre outras características do cálculo. O segundo ficheiro é capaz de ser lido no programa **Paraview** para se poder visualizar os aspetos gráficos da solução obtida.

1.4.5 **Paraview**

O programa **Paraview** é uma ferramenta de visualização gráfica onde se pode observar a geometria do modelo, as características de resistência do solo, as tensões aplicadas e a deformada resultante do carregamento.

Capítulo 2

Modelação da Variabilidade Espacial do Solo

2.1 Introdução

De acordo com Phoon e Kulhawy (1999), existem três fontes de incertezas de caracterização geotécnica do material. Incertezas relacionadas com a variabilidade inerente das propriedades do solo, erros de medição e incertezas de transformação do resultados obtidos.

Os maciços geotécnicos têm origem num processo de evolução natural, e a sua génese é tendencialmente contínua, portanto é favorecida a existência de uma correlação espacial entre as propriedades do maciço. Assim, a modelação da variabilidade inerente das propriedades do solo não deve ser um processo aleatório na atribuição das propriedades de resistência, mas sim um processo que correlaciona as propriedades de resistência de diversos pontos do espaço.

A variabilidade inerente das propriedades do solo pode ser modelada em função de um coeficiente de variabilidade e de uma escala de flutuação, comumente designado por comprimento de correlação espacial. O coeficiente de variabilidade define a relação entre o desvio-padrão e a média de uma propriedade do solo e o comprimento de correlação espacial define o comprimento de influência de uma propriedade.

O capítulo que se apresenta não foi o objeto de desenvolvimento nesta dissertação, servindo apenas para o enquadramento das metodologias utilizadas na modelação da variabilidade inerente das propriedades do solo.

2.2 Caracterização da variabilidade espacial do solo

2.2.1 Caracterização estatística das propriedades do solo

Phoon e Kulhawy (1999) propuseram a modelação da variabilidade espacial inerente das propriedades do solo com base em duas componentes, representadas na equação 2.1.

$$\xi(z) = t(z) + w(z) \quad (2.1)$$

onde z representa a profundidade a partir da superfície do terreno, $\xi(z)$ representa a propriedade do solo variável na profundidade, $t(z)$ é o valor da tendência determinística e $w(z)$ a variação residual. A equação 2.1 caracteriza assim a variabilidade inerente do solo em cada perfil ao longo da profundidade.

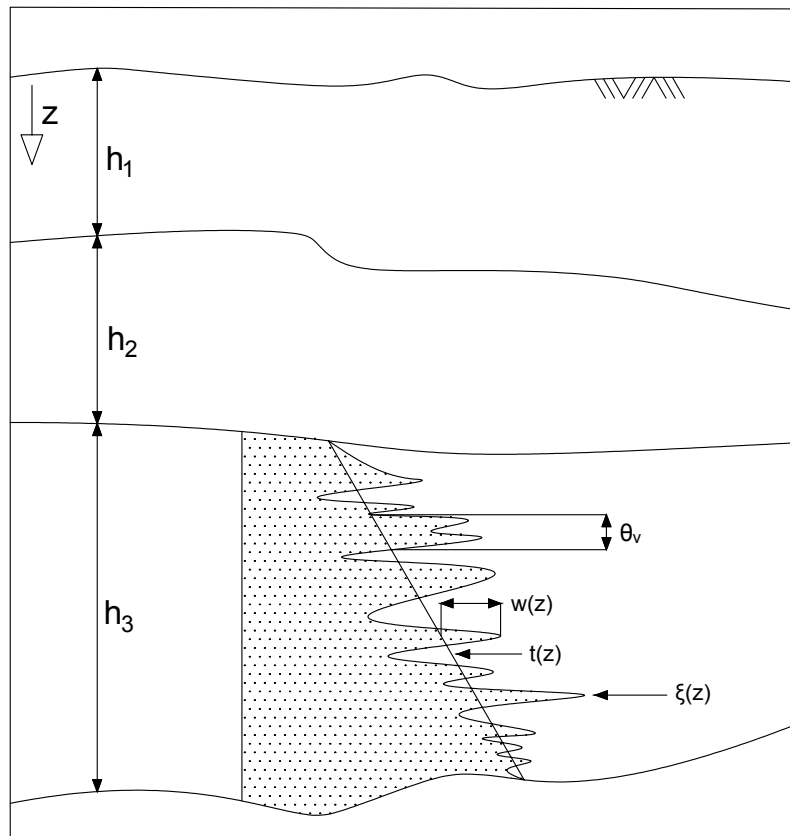


Figura 2.1: Variabilidade inerente do solo Phoon e Kulhawy (1999)

A tendência, $t(z)$, é caracterizada por uma equação que geralmente verifica a média dos valores extremos da variação residual. A variação residual da tendência, $w(z)$, é caracterizada estatisticamente como uma variável aleatória de média zero e por um desvio-padrão

não nulo da tendência. A sua variância é representada por:

$$\text{Var}[w(z)] = E[\{\xi(z) - t(z)\}^2] \quad (2.2)$$

Os ensaios de caracterização geotécnica criam um conhecimento sobre o maciço e informação sobre as suas propriedades limitadas. Por esta razão recorre-se à estatística para extrapolar os resultados da tendência determinística $t(z)$ e variação residual $w(z)$.

A variância dos resíduos, $\text{Var}[w(z)]$, quantifica a dispersão do valor de resistência do material entre a equação de ajuste, $t(z)$, e os valores reais observados, $\xi(z)$.

Verifica-se que a probabilidade de pontos vizinhos apresentarem propriedades semelhantes entre si é elevada. O fenómeno é importante pois pode-se depreender que, existindo uma correlação espacial elevada, existirão zonas alargadas do maciço com propriedades de resistência menores e zonas do terreno com propriedades de resistência elevadas. Este facto designa-se por autocorrelação espacial.

A autocorrelação espacial quantifica o grau de associação entre pontos contíguos do espaço, sendo estes pontos definidos por uma distância de correlação, θ_{c_u} .

2.2.2 Teoria dos campos aleatórios

Para a introdução da variabilidade espacial no modelo numérico por forma a ser utilizado no estudo de um problema geotécnico recorre-se frequentemente à teoria dos campos aleatórios.

A teoria dos campos aleatórios como técnica de modelação da variabilidade das propriedades do solo foi proposta por Vanmarcke (1983).

A teoria dos campos aleatórios tem por base o pressuposto de que a variável espacial $\xi(z)$ é a realização de um campo aleatório. Esta variável espacial representa uma grandeza genérica, no entanto neste caso de estudo representa uma propriedade geotécnica do maciço.

Não sendo este tema o objeto de desenvolvimento desta dissertação, aconselha-se a consulta da obra de Vanmarcke (1983) para informações mais detalhadas sobre o tema.

2.2.3 Adequabilidade das distribuições estatísticas da propriedades geotécnicas

A distribuição normal é a mais comum ser utilizada em problemas geotécnicos, por ter comprovado a aplicabilidade do teorema do limite central. O teorema afirma que a soma de um grande número de amostras aleatórias individuais tende para a distribuição normal à medida que o mesmo número de amostras aumenta.

A distribuição log-normal descreve a distribuição de uma variável cujo logaritmo é normalmente distribuído. O teorema do limite central pode ser estendido a esta distribuição. É possível demonstrar que a sua aplicação nesta distribuição descreve também uma variável formada pelo produto de acontecimentos independentes, quando o número de acontecimentos é elevado. Esta distribuição tem a característica de ser estritamente positiva, e portanto de permitir que se evitem inconsistências físicas, que no caso de aplicação à geotecnia é importante.

As distribuições normal e log-normal podem ser adotadas para modelação da maioria dos dados geotécnicos. No entanto, é de salientar que o facto destas distribuições serem ilimitadas pode levar a que se obtenham valores de propriedades geotécnicas muito elevados. De referir que dependendo do ponto de vista, o fenómeno anteriormente descrito pode não ser descabido do que se verifica na realidade. Pode-se no estudo de Chiasson et al. (1995) as distribuições obtidas para os valores de resistência ao corte não drenada do solo. Verifica-se que estas se assemelham às distribuições normal e log-normal.

No presente trabalho foi adotada a distribuição log-normal para a avaliação da influência da variabilidade das propriedades de resistência não drenada do solo.

2.2.4 Estimativas de medidas estatísticas das propriedades do solo

Os valores dos parâmetros das propriedades do solo demonstram elevada variabilidade. Pela observação dos valores recolhidos por diversos autores de propriedades do solo, tais como, resistência ao corte, peso volúmico, etc, os maciços não apresentam homogeneidade aparente, tal como seria de esperar. Estes valores encontram-se apresentados na tabela 2.1.

Note-se que os coeficientes de variabilidade apresentados podem não ser correspondentes ao coeficiente de variabilidade real do solo. Tal como descrito anteriormente, os valores obtidos podem ter diversas fontes de incertezas.

Constata-se que o valor médio para o coeficiente de variabilidade da resistência ao corte em condições não drenadas é de 0,3 sendo o seu valor máximo 0,49.

Tabela 2.1: Recolha bibliográfica de coeficientes de variação de propriedades do solo

Parâmetro do Terreno	Fonte Bibliográfica	Intervalo de CV	Valor Médio de CV
Ângulo de resistência ao corte <i>Areias</i>	Phoon e Kulhawy (1999)	0,05-0,11	0,09
Ângulo de resistência ao corte <i>Argilas Siltosas</i>	Phoon e Kulhawy (1999)	0,10-0,50	0,21
	Phoon e Kulhawy (1999)	0,04-0,12	0,09
Resistência ao corte não drenada <i>Argilas</i>	Phoon e Kulhawy (1999) ^a	0,18-0,42	0,32
Resistência ao corte não drenada <i>Argilas Siltosas</i>	Phoon e Kulhawy (1999) ^c	0,11-0,49	0,22
Resistência ao corte não drenada <i>Finos Graduados</i>	Phoon e Kulhawy (1999) ^d	0,06-0,56	0,33

^aEnsaio triaxial consolidado isotrópico não drenado^bTipo de ensaio não reportado^cEnsaio triaxial não consolidado não drenado^dEnsaio de compressão simples

2.3 Métodos de simulação de variabilidade espacial do solo

2.3.1 Método do Hipercubo Latino

A modelação numérica da variabilidade espacial das propriedades do solo tem origem na conjugação de métodos de simulação com métodos de geração de variáveis aleatórias. No presente estudo, o método de simulação adotado foi o método do Hipercubo Latino em conjugação com o método da Decomposição de Cholesky para criação das variáveis aleatórias.

O método do Hipercubo Latino é uma técnica frequentemente utilizada para a redução da variância. Técnicas de redução de variância permitem diminuir o tempo de processamento das simulações, consequentemente aumentando a sua eficiência e exigir um custo computacional menor.

O método do Hipercubo Latino gera variáveis aleatórias a partir de uma matriz **P**, com dimensões $N \times K$, onde N é o número de amostras e K o número de variáveis aleatórias. Cada uma das colunas da matriz **K** em conjugação com uma permutação aleatória de valores, do intervalo a amostrar entre 1 e N para cada variável, gera a matriz **P**. A seleção do valor a amostrar de cada intervalo é introduzido numa matriz que vamos definir como **R**. Esta matriz tem igual dimensão que **P** e é constituída por valores aleatórios uniformemente distribuídos entre 0 e 1. Deste modo, as coordenadas de cada amostra no espaço de probabilidades são definidas por,

$$\mathbf{S} = \frac{1}{N}(\mathbf{P} - \mathbf{R}) \quad (2.3)$$

A equação:

$$x_{ij} = F_{xj}^{-1}(s_{ij}) \quad (2.4)$$

define o valor de cada variável aleatória no espaço amostral onde F_{xj}^{-1} representa a inversa da distribuição de probabilidades associada à variável j .

A matriz de covariância \mathbf{Y} é definida por,

$$y_{ij} = \Phi^{-1}\left(\frac{p_{ij}}{N+1}\right) \quad (2.5)$$

onde Φ^{-1} representa a inversa da função densidade da distribuição normal padrão.

A aplicação do método de Cholesky à covariância da matriz \mathbf{Y} é dada por,

$$\tilde{\mathbf{L}}\tilde{\mathbf{L}}^T = \text{Cov}(\mathbf{Y}) \quad (2.6)$$

onde \mathbf{L} é uma matriz triangular inferior. No método de Cholesky a matriz \mathbf{Y} é decomposta em matrizes triangulares superior e inferior.

Uma nova matriz \mathbf{Y}^* pode ser calculada na forma,

$$\mathbf{Y}^* = \mathbf{Y}(\tilde{\mathbf{L}}^{-1})\mathbf{L}^T \quad (2.7)$$

Cada coluna da matriz \mathbf{Y}^* é ordenada, sendo esta nova ordenação da matriz \mathbf{Y}^* utilizada para construir uma matriz \mathbf{P}^* .

Voltando ao início do método, na equação 2.3, a matriz \mathbf{P}^* pode ser utilizada para construir uma matriz \mathbf{S}^* . A matriz \mathbf{S}^* permite construir uma matriz \mathbf{X}^* . Cada linha desta

matriz corresponde a uma variável aleatória no espaço amostral. Estas variáveis aleatórias têm distribuição normal, com média zero, desvio-padrão unitário e uma determinada correlação espacial. A matriz \mathbf{X}^* servirá para modelar o campo aleatório que simula a distribuição das propriedades do solo.

2.4 Metodologia de aplicação da variabilidade inerente do solo ao modelo

A variabilidade inerente das propriedades do solo é modelada recorrendo a métodos que variam os valores das propriedades do solo consoante a sua localização. Métodos esses que são descritos nas secções anteriores e que não são o objeto de estudo desta dissertação.

O método do Hipercubo Latino, implementado a fim de modelar a variabilidade inerente do solo, gera uma distribuição normal destas propriedades. Através desta, é possível obter uma distribuição log-normal para uma melhor adaptabilidade das propriedades de resistência não drenada do solo,

$$c_{u_{ij}} = \exp(\mu_{\ln c_u} + \sigma_{\ln c_u} x_{ij}^*) \quad (2.8)$$

onde $c_{u_{ij}}$ representa a caracterização probabilística da resistência não drenada do solo do elemento j na amostra i . Os valores $\mu_{\ln c_u}$ e $\sigma_{\ln c_u}$ são os parâmetros da distribuição log-normal que caracteriza a propriedade de resistência ao corte não drenada do solo.

A expressão anterior é função de quatro parâmetros $\mu_{\ln c_u}$, $\sigma_{\ln c_u}$, $\theta_{H_{c_u}}$ e $\theta_{V_{c_u}}$. Os parâmetros $\mu_{\ln c_u}$ e $\sigma_{\ln c_u}$ podem ser definidos a partir dos parâmetros média e desvio-padrão μ_{c_u} e σ_{c_u} com significado físico descrito nas expressões,

$$\sigma_{\ln c_u} = \sqrt{\ln \left\{ 1 + \left(\frac{\sigma_{c_u}}{\mu_{c_u}} \right)^2 \right\}} = \sqrt{\ln \{ 1 + (CV_{c_u})^2 \}} \quad (2.9)$$

$$\mu_{\ln c_u} = \ln \mu_{c_u} - \frac{1}{2} \sigma_{\ln c_u}^2 \quad (2.10)$$

O parâmetro CV_{c_u} representa o coeficiente de variabilidade da propriedade de resistência do solo, sendo este um valor adimensional.

Os dois parâmetros que são designados por $\theta_{H_{c_u}}$ e $\theta_{V_{c_u}}$ representam os comprimentos de correlação espacial, horizontal e vertical, respetivamente. Estes valores podem ser adimensionalizados, e para tal recorre-se à relação, no caso de uma correlação isotrópica:

$$\Theta_{c_u} = \frac{\theta_{c_u}}{D} \quad (2.11)$$

onde Θ_{c_u} representa o comprimento de correlação espacial isotrópica e D o diâmetro do túnel.

Com os parâmetros anteriores definidos, pode-se proceder à criação de uma malha estatística para o domínio corresponde à malha de elementos finitos. Pode ser escolhida a dimensão dos elementos que a compõem, indicando o número de divisões que se quer do domínio nas duas direções, tal como acontece com a malha de elementos finitos.

Capítulo 3

Influência da malha estatística

Neste capítulo foi avaliada a influência da malha estatística na estabilidade do túnel em análise. Em primeira instância pretende-se saber até que ponto se deve refinar a malha estatística de modo a se obter resultados com um grau de precisão aceitável. Para tal, as malhas foram sendo consecutivamente refinadas até não ser possível obter alterações significativas nos resultados.

Previamente a este estudo, foi avaliada a influência da dimensão dos elementos constituintes da malha de elementos finitos sobre o resultado do número de estabilidade.

3.1 Influência da malha de elementos finitos

As dimensões dos elementos da malha de elementos finitos são definidas pela expressão,

$$s = \frac{S}{D} \quad (3.1)$$

sendo D o diâmetro do túnel e S o número de divisões que se pretenda no diâmetro. O valor s representa a largura e altura dos elementos da malha elementos finitos em metros, (m).

Foram estudados modelos com as dimensões de elementos finitos, s , com os valores de 0.4, 0.2, 0.1 e 0.05. Os resultados encontram-se representados na Tabela 3.1 e podem-se observar graficamente na Figura 3.1.

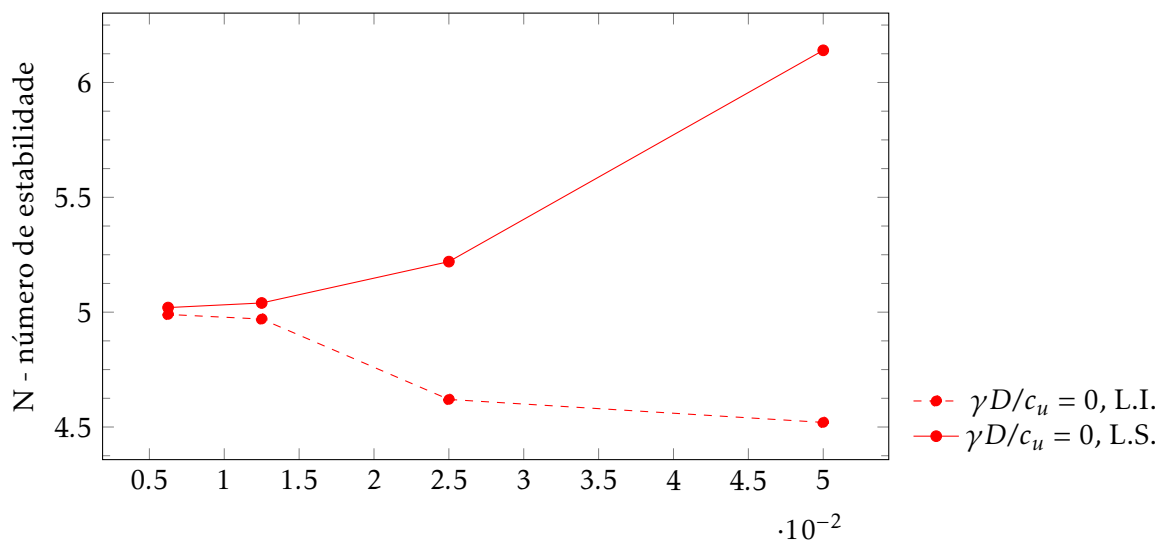
Verifica-se que uma malha de elementos finitos com as dimensões, largura e altura, de $s = 0.1$, se obtém resultados com um erro de precisão aceitável.

Tabela 3.1: Influência da dimensão dos elementos finitos no número de estabilidade para as profundidades $C/D = 1$

C/D	s	Número de elementos no perímetro do túnel ⁻¹	$\gamma D/c_u$	N - número de estabilidade	
				L.I.	L.S.
1	0.4	1/20	0	4.52	6.14
	0.2	1/40		4.62	5.22
	0.1	1/80		4.97	5.04
	0.05	1/160		4.99	5.02

L.I. - Limite inferior

L.S. - Limite superior

Figura 3.1: Estudo da influência da malha de elementos finitos em $C/D = 1$

3.1.1 Estudo do modelo de solo homogêneo

Estando o estudo da influência da malha de elementos finitos concluída, proceder-se-á nesta secção, ao estudo do modelo considerando a hipótese de solo homogêneo. Será, portanto, estudada a estabilidade do túnel às profundidades relativas, C/D , de 1, 2, 3 e 4.

Apresentam-se na Tabela 3.2 os resultados obtidos para os números de estabilidade dos modelos estudados.

Tabela 3.2: Limite superior do número de estabilidade para o modelo homogêneo da malha $s = 0,1$ nas diferentes profundidades estudadas.

Resistência não drenada (c_u)	D (m)	C/D	N - número de estabilidade	
			$\gamma D/c_u = 0$	$\gamma D/c_u = 1$
100	1	1	5.03	4.18
		2	7.06	5.02
		3	8.39	5.25
		4	9.38	4.91

A Figura 3.2 representa graficamente a evolução dos valores do número de estabilidade apresentados na Tabela 3.2.

Pode-se verificar tanto na Tabela 3.2 e na Figura 3.2 que os valores e a evolução do número de estabilidade se encontram dentro do esperado de acordo com Sloan e Assadi (1993) e Salgueiro (2010).

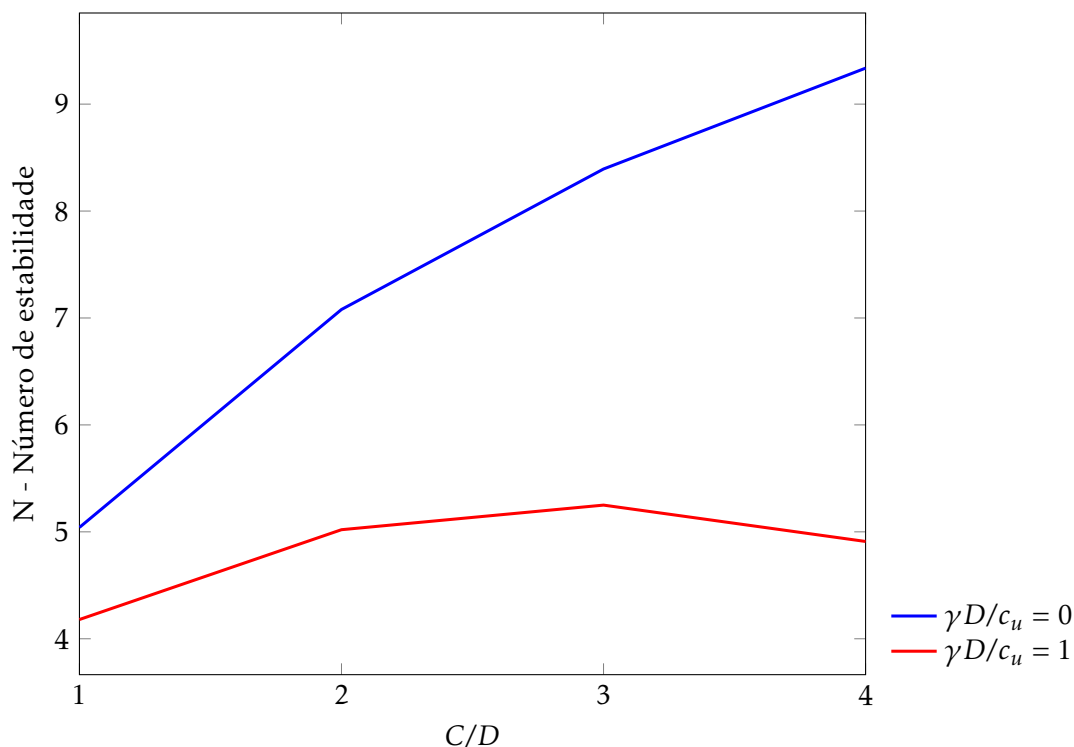


Figura 3.2: Evolução dos valores médios do número de estabilidade do modelo homogêneo com a profundidade.

3.2 Dimensão dos elementos da malha estatística

Para facilidade de leitura desta análise, esclarece-se aqui o formato de apresentação das malhas estatísticas. Estas são apresentadas como $\mathbf{H} \times \mathbf{V}$. \mathbf{H} representa o número de divisões no seu comprimento e \mathbf{V} representa o número de divisões na sua altura. A cada elemento da malha estatística é atribuída uma propriedade, neste caso, uma propriedade de resistência não drenada.

O número de cálculos para cada malha estatística é o número de amostras por par $(CV_{c_u}; \Theta_{c_u}) + 1$.

Da análise dos resultados obtidos chegou-se à conclusão que para distâncias de correlação curtas, $\theta_{c_u} = \{0.125, 0.5\}$, a malha estatística 100×40 representa favoravelmente os resultados. Para distâncias de correlação espacial maiores, $\theta_{c_u} = \{1, 2, 4\}$, os resultados da malha estatística 50×20 apresentam um erro de precisão aceitável.

Apresentam-se na Tabela 3.3 as malhas estatísticas estudadas. A título de exemplo, representa-se esquematicamente na Figura 3.3 as malhas estatísticas para a profundidade $C/D = 1$. As restantes profundidades são apresentadas nas figuras B.2, B.3, B.4 e B.5, em anexo.

Tabela 3.3: Malhas estatísticas bidimensionais estudadas na Profundidade $C/D=1$

Caso	Número de Elementos da Malha Estatística no diâmetro (D)	Número Total de Elementos da Malha Estatística	Número de Elementos Finitos (Triangulares) por Elemento de Malha Estatística	Número de Amostras por par ($CV_{c_u}; \Theta_{c_u}$)
1	$\simeq 2,5$	24×10	$\simeq 64$	240
2	5	50×20	16	1000
3	10	100×40	4	4000
4	20	200×80	2	16000

Tabela 3.4: Dimensão dos elementos quadrangulares das malhas estatísticas estudadas

Malha estatística	Dimensão dos elementos (m)
24×10	0,4167
50×20	0,2
100×40	0,1
200×80	0,05

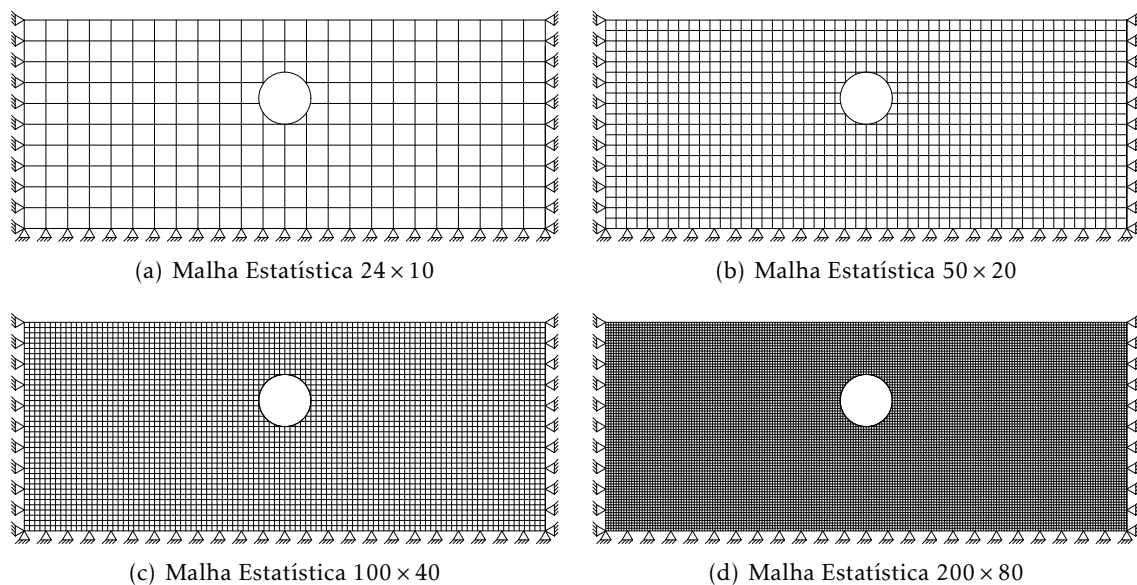


Figura 3.3: Malhas estatísticas estudadas à profundidade $C/D = 1$

3.3 Concordância dimensional

Neste estudo, o número de divisões foi cuidadosamente escolhido para a malha estatística e de elementos finitos estarem em concordância dimensional. Pretende-se com esta concordância que as dimensões da malha estatística e as da malha de elementos finitos sejam um múltiplo entre si. A razão para tal é a forma de atribuição das propriedades de resistência não drenada do solo, em que se encontra o centro de gravidade de cada elemento finito triangular, e verifica se este se encontra dentro de cada divisão da malha estatística.

Na Tabela 3.4 pode-se verificar que a dimensão dos elementos da malha estatística 24×10 são de $0,4167(m)$. O facto deste valor não estar em concordância dimensional com a malha de elementos finitos justifica-se por se querer que as malhas estatísticas tenham um número inteiro de elementos no seu eixo de simetria. Não será desejável existir uma zona centrada no alinhamento vertical do eixo do túnel que tenha 40% da largura do diâmetro deste com uma propriedade de resistência claramente definida.

Caso se quisesse que a dimensão dos elementos desta malha fosse $0,4(m)$ para estar concordância dimensional com a malha de elementos finitos, então a malha estatística teria as dimensões 25×10 . No entanto, se se dividísse o modelo pelo seu eixo de simetria ficaríamos com 12,5 elementos, o que, como explicado acima, não seria desejável.

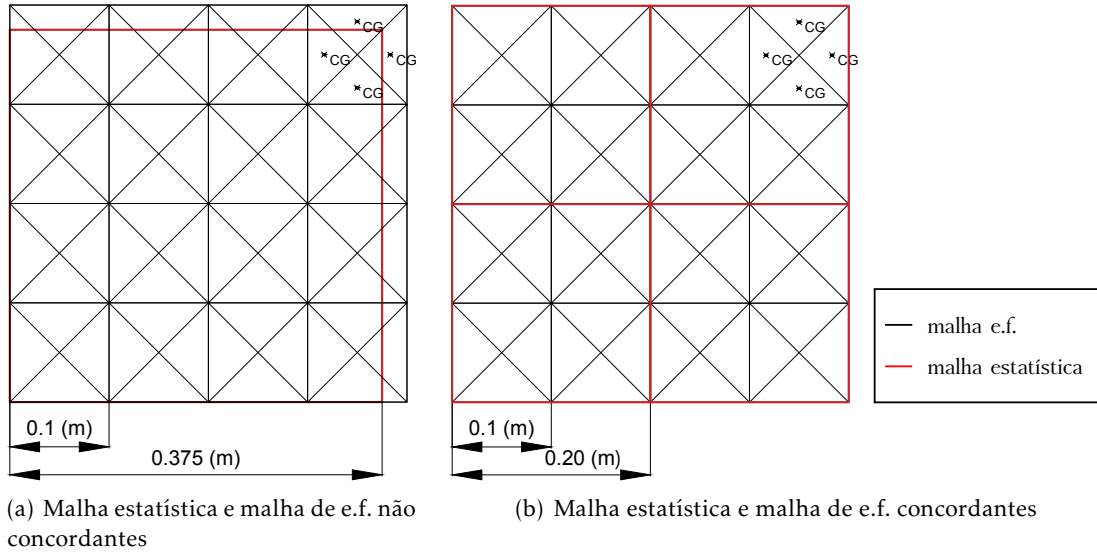


Figura 3.4: Exemplo mostrando a importância da escolha e concordância entre a malha estatística e a malha de elementos finitos para a atribuição das propriedades de resistência

3.4 Estudo da influência da malha estatística

Nesta fase apenas se procedeu ao cálculo das malhas estatísticas que correspondem ao coeficiente de variabilidade $CV_{c_u} = 4$ e aos valores de correlação espacial $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 4; 8\}$ para a profundidade $C/D = 1$. Foi escolhido realizar apenas o cálculo para $CV_{c_u} = 4$ pois este representa, neste estudo, o maior desvio-padrão da resistência não drenada do solo.

Nas Figuras 3.5 e 3.6 apresentam-se os resultados do número de estabilidade médio e o desvio-padrão obtidos, para $\gamma D/c_u = 0$ em função da distância de correlação correspondentes às malhas estatísticas estudadas para $C/D = 1$.

Da análise das figuras conclui-se que se vai optar por uma escolha híbrida entre duas malhas, as malhas 100×40 para $\Theta_{c_u} \in \{0, 125; 0, 5\}$ e 50×20 para $\Theta_{c_u} \in \{1, 2 \text{ e } 4\}$, de modo a que se consiga diminuir o número de cálculos necessários e consequentemente o tempo e potência computacional despendidos. Escolheu-se também limitar o estudo a $\Theta_{c_u} = 4$.

Pode-se verificar que a evolução dos valores do número de estabilidade para o modelo considerando uma estrutura de correlação isotrópica está dentro da evolução esperada de acordo com Simões (2012).

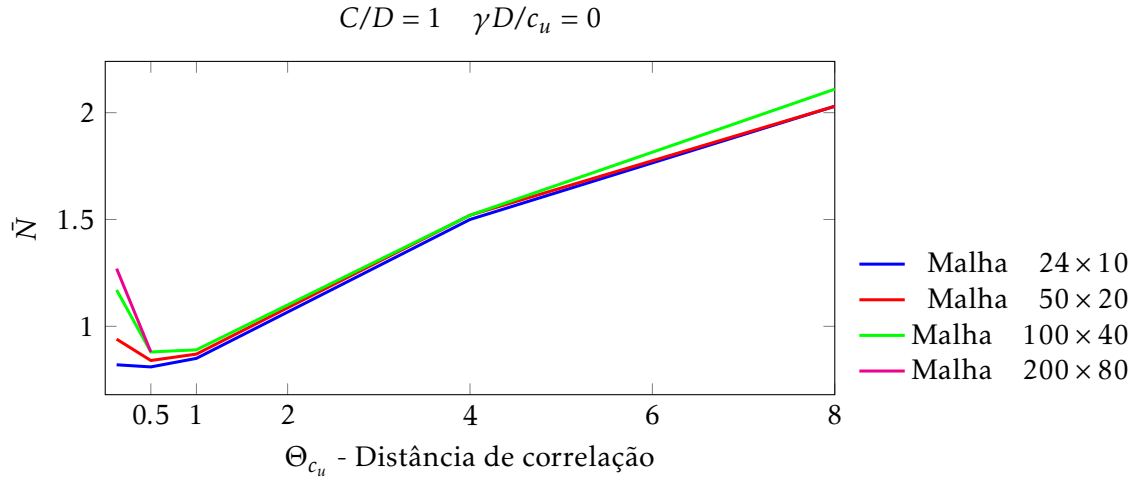


Figura 3.5: Evolução do valor médio do número de estabilidade em função do valor de Θ_{c_u} para $\gamma D/c_u = 0$ com $CV_{c_u} = 4$, para as quatro malhas estatísticas estudadas.

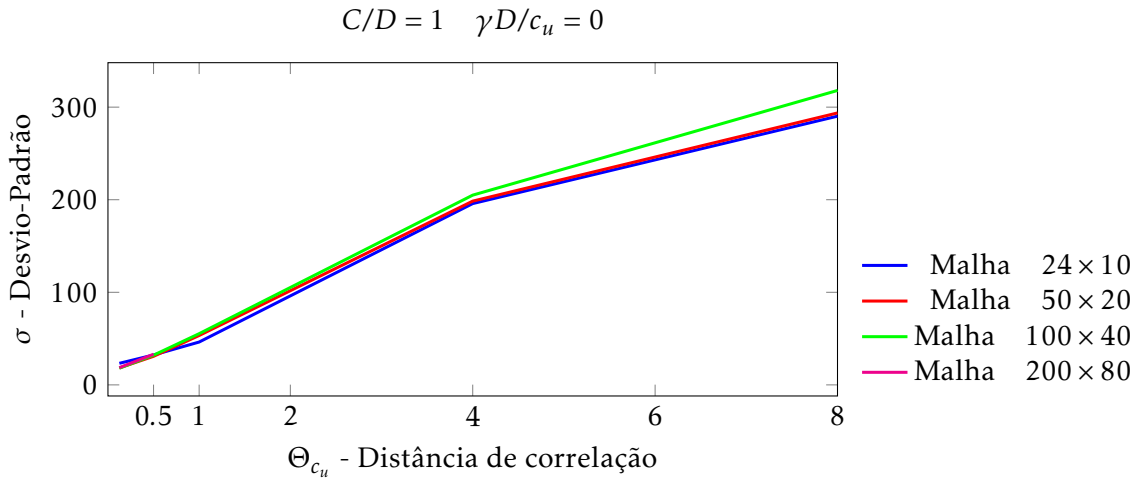


Figura 3.6: Evolução do valor do desvio-padrão em função do valor de Θ_{c_u} para $\gamma D/c_u = 0$ com $CV_{c_u} = 4$, para as quatro malhas estatísticas estudadas.

3.5 Influência da distância de correlação espacial

Pretende-se nesta secção fazer uma pequena nota sobre a influência da distância de correlação espacial.

Quanto maior o valor da distância de correlação espacial, maior será a probabilidade de pontos adjacentes ou muito próximos possuírem a mesma propriedade e vice-versa.

Pode-se verificar na Figura 3.7 a influência da distância de correlação espacial na distribuição espacial da resistência ao corte não drenada do solo. Para valores maiores de Θ_{c_u} pode ser fácil de prever onde ocorrerá o mecanismo de colapso.

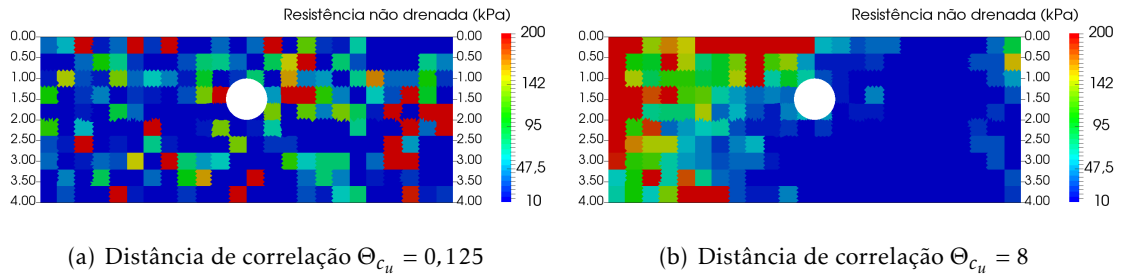


Figura 3.7: Influência da distância de correlação Θ_{c_u} na distribuição da resistência ao corte não drenada à profundidade $C/D = 1$ para $CV_{c_u} = 4$ para a malha 24×10

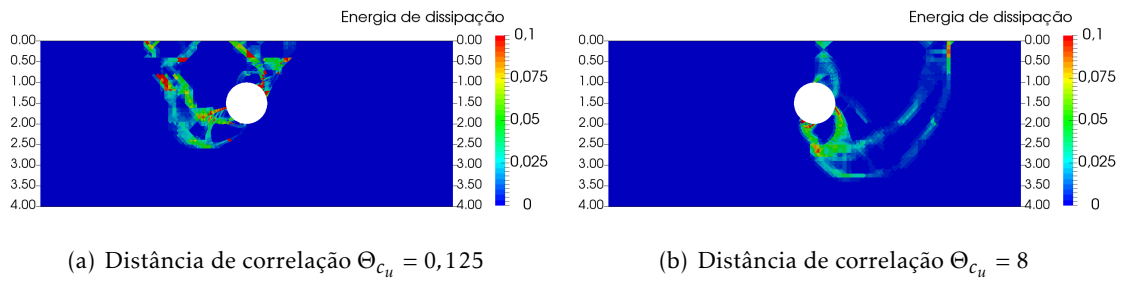


Figura 3.8: Mecanismos de colapso à profundidade $C/D = 1$ para $CV_{c_u} = 4$ para as distribuições apresentadas da Figura 3.7

3.6 Conclusões do capítulo

Apresenta-se na Tabela 3.5 a escolha das dimensões dos elementos para as malhas estatísticas que otimizam simultaneamente o tempo de cálculos e qualidade de resultados obtidos.

Tabela 3.5: Dimensões dos elementos das malhas estatísticas em função de Θ_{c_u}

Θ_{c_u}	Malha	Dimensão dos elementos (m)
0,125 0,5	100 × 40	0,1
1 2 4	50 × 20	0,2

Das figuras pode-se verificar e concluir que o valor do número de estabilidade médio considerando a variabilidade do solo respondendo em condições não drenadas é sempre menor quando comparado com o seu valor num caso de solo homogêneo.

A influência do valor da distância de correlação espacial é significativa e quanto maior

este for, maior será o número de estabilidade para o mesmo coeficiente de variabilidade espacial. Um maior valor de Θ_{c_u} representa a possibilidade de existência de maiores zonas com propriedades semelhantes. O aumento de Θ_{c_u} representa a tendência para a homogeneização do maciço.

Capítulo 4

Estudo da influência dos parâmetros geométricos e de resistência no problema da estabilidade dos túneis

4.1 Introdução

Neste capítulo pretende-se analisar a influência do coeficiente de variabilidade e a influência da distância de correlação na estabilidade dos túneis, dispostos nas diferentes profundidades a que se submete este estudo. Neste capítulo serão estudados os parâmetros seguintes nas suas respectivas variações:

- $C/D \in \{1; 2; 3; 4\}$
- $\gamma D/c_u \in \{0; 1\}$
- $CV_{c_u} \in \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$
- $\Theta_{c_u} \in \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

Note-se que como referido no capítulo 3, não se realizam os cálculos correspondentes a $\Theta_{c_u} = 8$. Como concluído no capítulo anterior, as malhas estatísticas utilizadas para o estudo bidimensional serão as apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Número de elementos das malhas estatísticas e correspondente dimensão dos elementos em função de Θ_{c_u} e C/D .

C/D	Θ_{c_u}				
	0,125	0,5	1	2	4
1	100×40		50×20		
2	100×50		50×25		
3	100×60		50×30		
4	100×70		50×35		
Dimensão dos elementos da malha estatística (m)	0,1		0,2		

4.2 Resultados

$C/D=1$

Na Figura 4.1 apresenta-se a comparação de alguns exemplos da distribuição da resistência ao corte não drenada no maciço e os respectivos mecanismos de colapso obtidos. Estes exemplos representam os limites mínimos e máximos do coeficiente de variabilidade, CV_{c_u} , e da distância de correlação espacial Θ_{c_u} para a profundidade estudada $C/D = 1$.

Os mecanismos de colapso que vemos nas Figura 4.1 representam uma taxa da energia de dissipação. Esta taxa representa o rácio entre a energia de dissipação de cada elemento triangular e a energia de dissipação máxima presente no domínio.

Pode-se observar que para baixos valores de CV_{c_u} os mecanismos de colapso do túnel se aproximam dos mecanismos de colapso do modelo de solo homogéneo e que os mesmos associados a valores de CV_{c_u} elevados, são de mais difícil previsão.

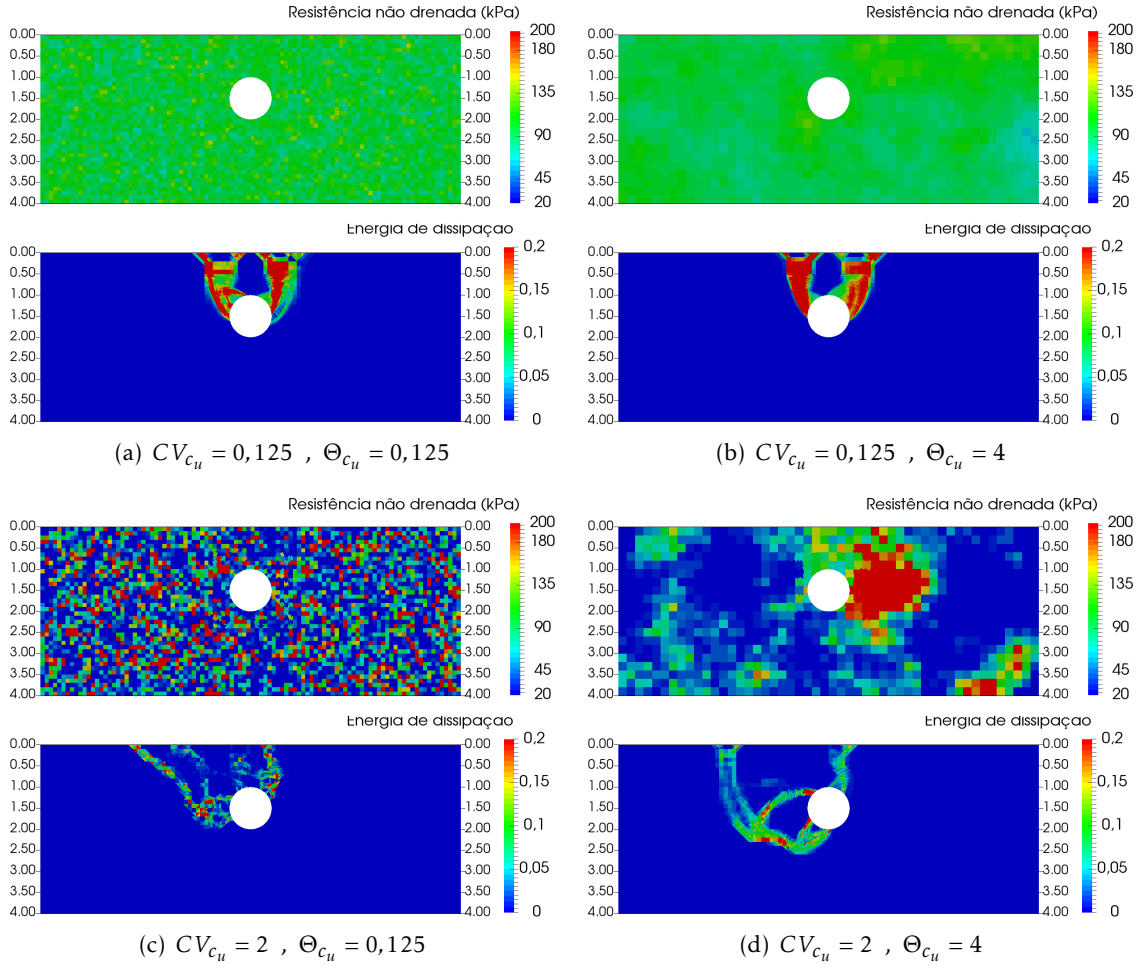


Figura 4.1: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$

A Figura 4.2 representa graficamente a evolução dos valores do número de estabilidade médio à profundidade $C/D = 1$.

É evidenciado pela representação gráfica da Figura 4.2 que o valor do número de estabilidade médio é tanto menor quanto maior for o coeficiente de variabilidade das propriedades de resistência do solo, independentemente do valor da distância de correlação espacial no intervalo estudado. Nada impede que se verifique que para valores muito elevados da distância de correlação espacial, o valor da carga de colapso do modelo heterogéneo considerando uma estrutura de correlação isotrópica seja tendencialmente maior independentemente do valor do coeficiente de variabilidade.

A figura 4.3 mostra a evolução do valor do desvio padrão para $C/D = 1$ e $\gamma D/c_u = 0$.

À semelhança dos autores Griffiths e Fenton (2001), as Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram a probabilidade de $P(\tilde{N}_i \leq N_{homog\acute{e}neo}/FS)$ para $C/D = 1$ e $\gamma D/c_u = 0$, com factores de

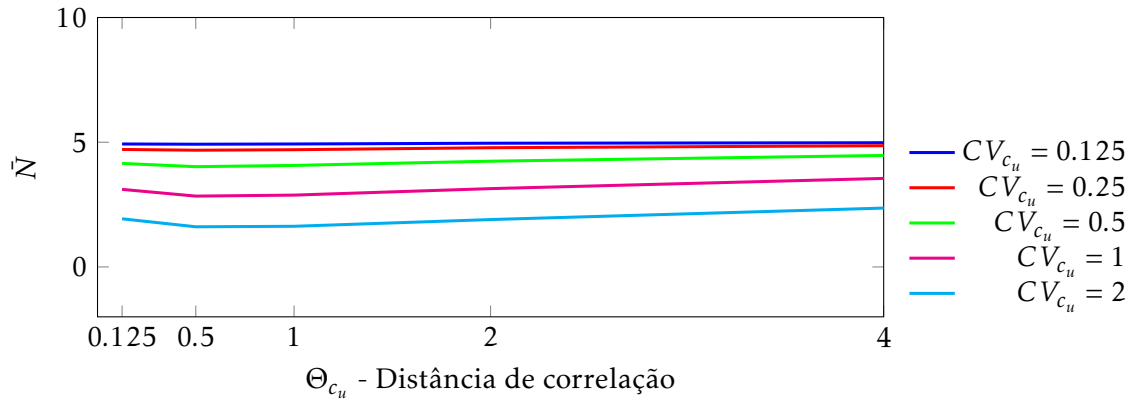


Figura 4.2: Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

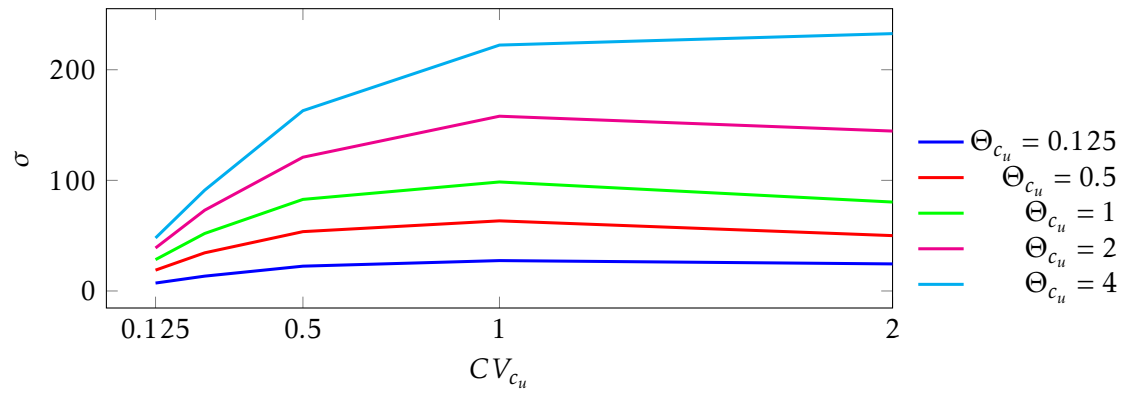


Figura 4.3: Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

segurança, FS , de 1, 2 e 3, respectivamente. Pode-se verificar que para valores altos de Θ_{c_u} existe uma menor probabilidade de N ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/FS)$ independentemente do valor de CV_{c_u} , o que mostra a homogeneização do maciço.

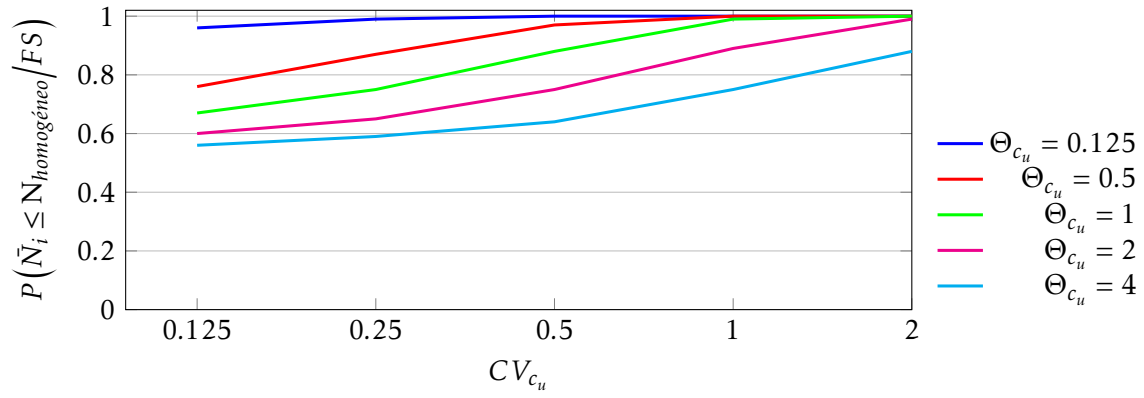


Figura 4.4: Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

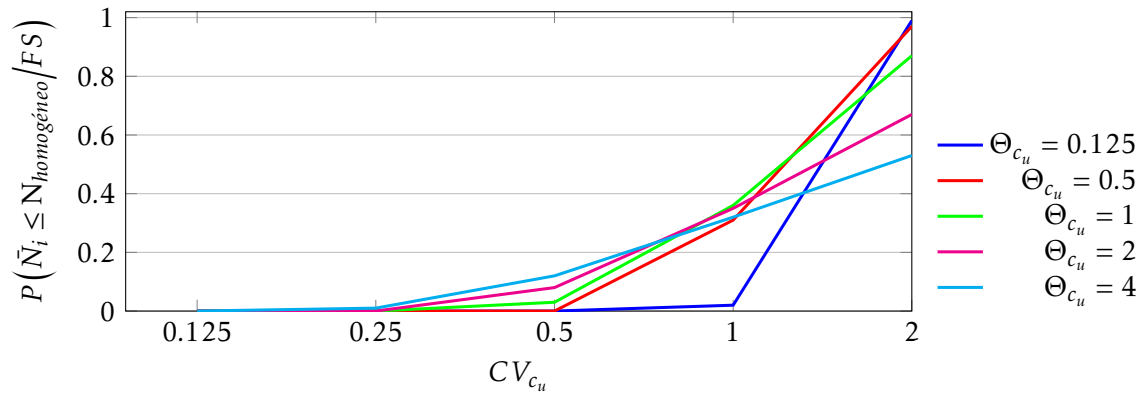


Figura 4.5: Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

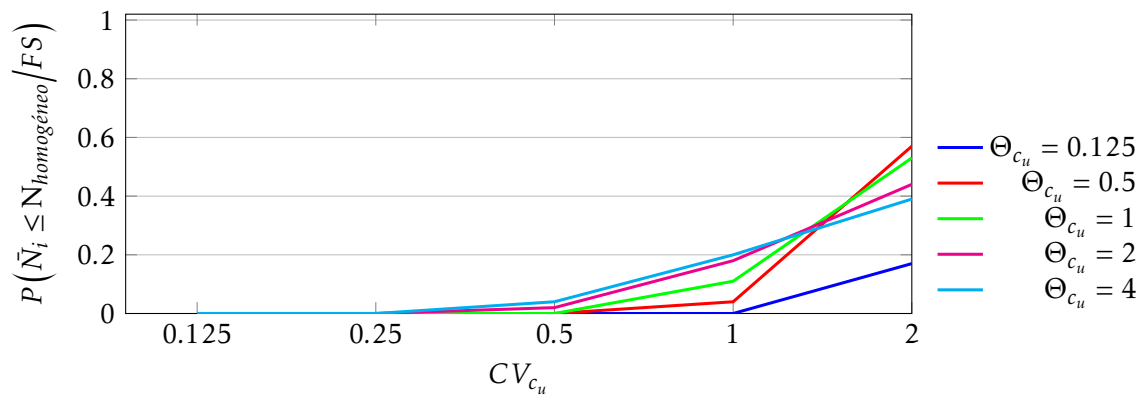


Figura 4.6: Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

$C/D=2$

Assim como na secção anterior, a Figura 4.7 apresenta a comparação de alguns exemplos da distribuição da resistência ao corte não drenada no maciço e os respectivos mecanismos de colapso obtidos.

Na Figura 4.8 pode-se verificar as mesmas tendências que na figura 4.2. Pode-se notar como esperado que o aumento da profundidade se traduz num aumento dos valores médios do número de estabilidade.

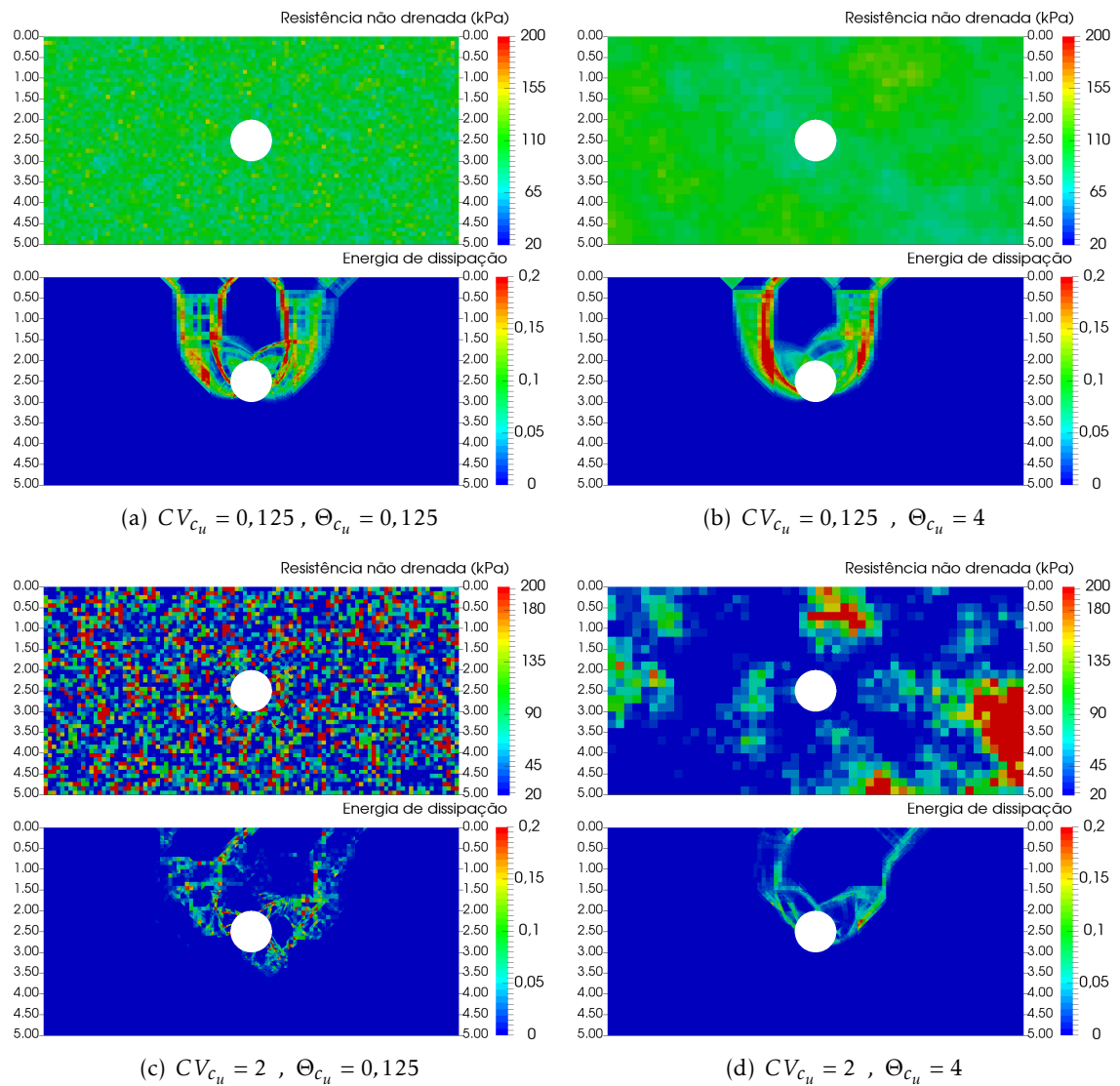


Figura 4.7: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 mostram a probabilidade de $P(\bar{N}_i \leq N_{homog\acute{e}neo}/FS)$ para $C/D = 2$ e $\gamma D/c_u = 0$, com factores de segurança, FS , de 1, 2 e 3, respectivamente.

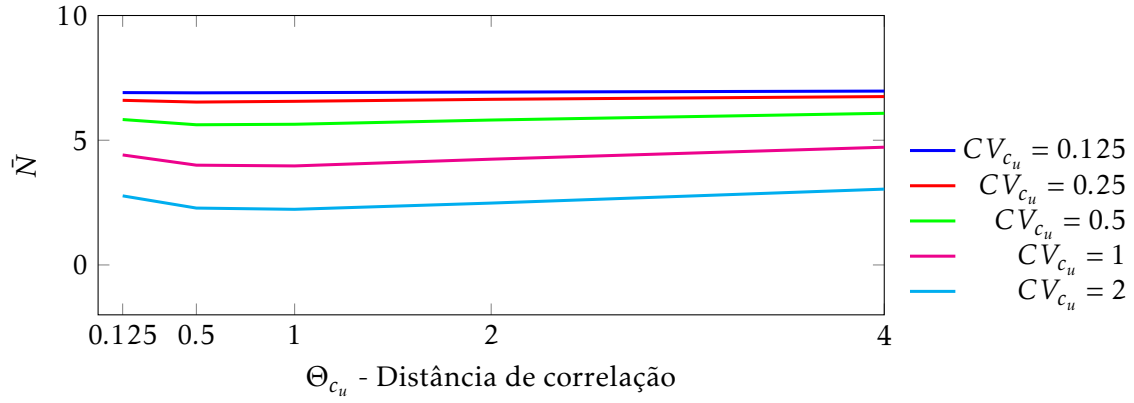


Figura 4.8: Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

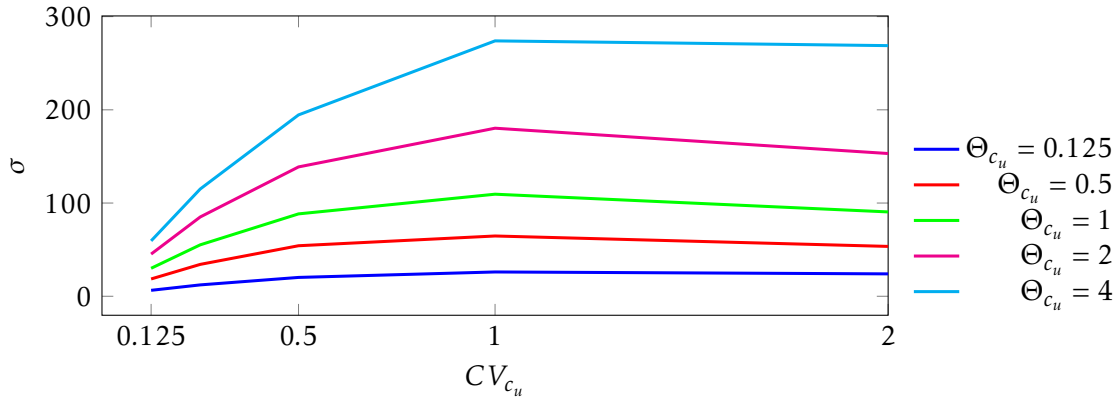


Figura 4.9: Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

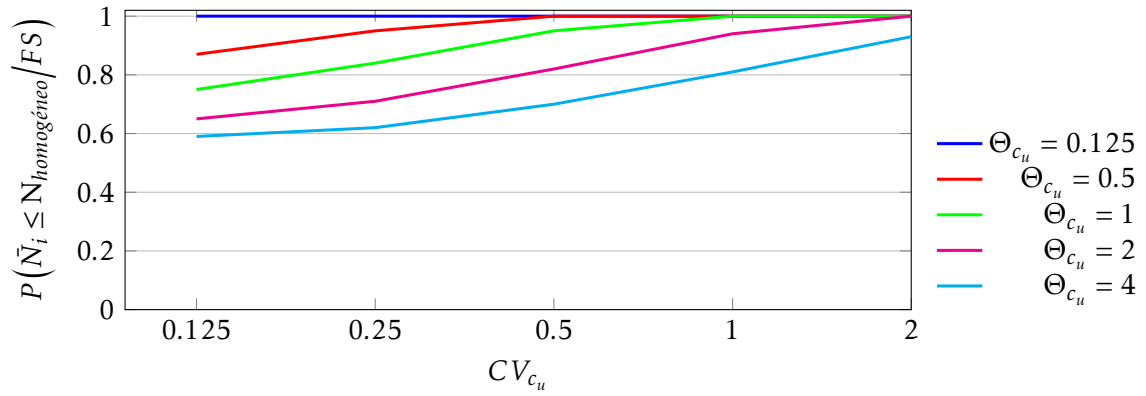


Figura 4.10: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homogeneo}/1)$ para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

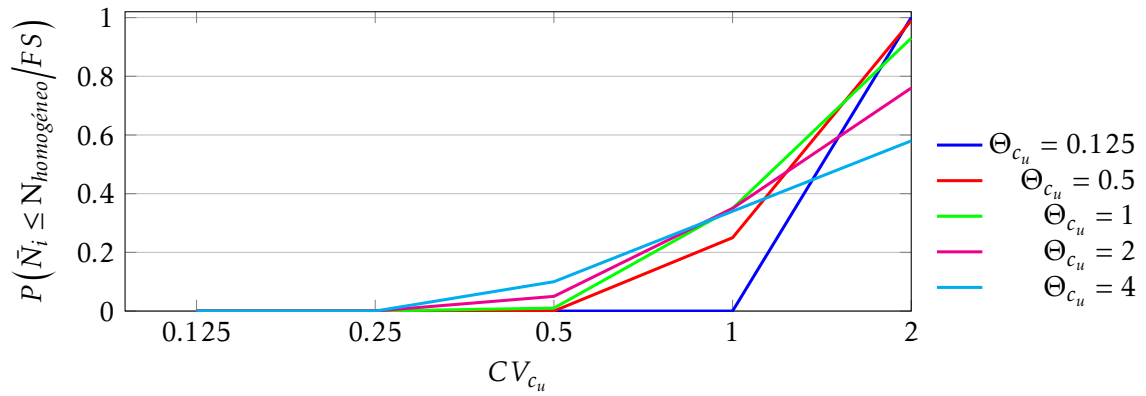


Figura 4.11: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homogeneo}/2)$ para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

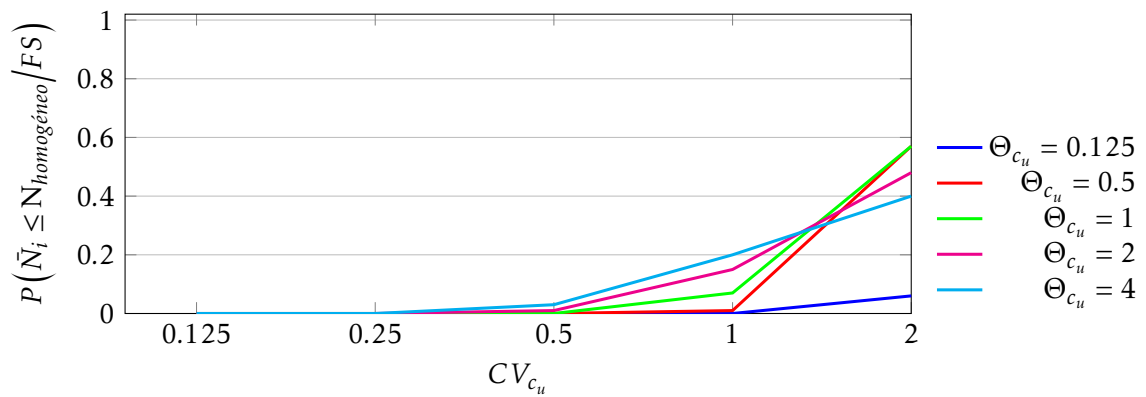


Figura 4.12: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homogeneo}/3)$ para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

C/D=3

A Figura 4.13 apresenta para a profundidade $C/D = 3$ a comparação de alguns exemplos da distribuição da resistência ao corte não drenada no maciço e os respectivos mecanismos de colapso obtidos.

Pode-se verificar que se repete a mesma tendência da secção anterior na Figura 4.14. Novamente e tal como esperado verifica-se que o aumento da profundidade traduz consequentemente o aumento dos valores médios do número de estabilidade.

As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 mostram a probabilidade de $P(\tilde{N}_i \leq N_{homog\acute{e}neo}/FS)$ para $C/D = 3$ e $\gamma D/c_u = 0$, com factores de segurança, FS , de 1, 2 e 3, respectivamente.

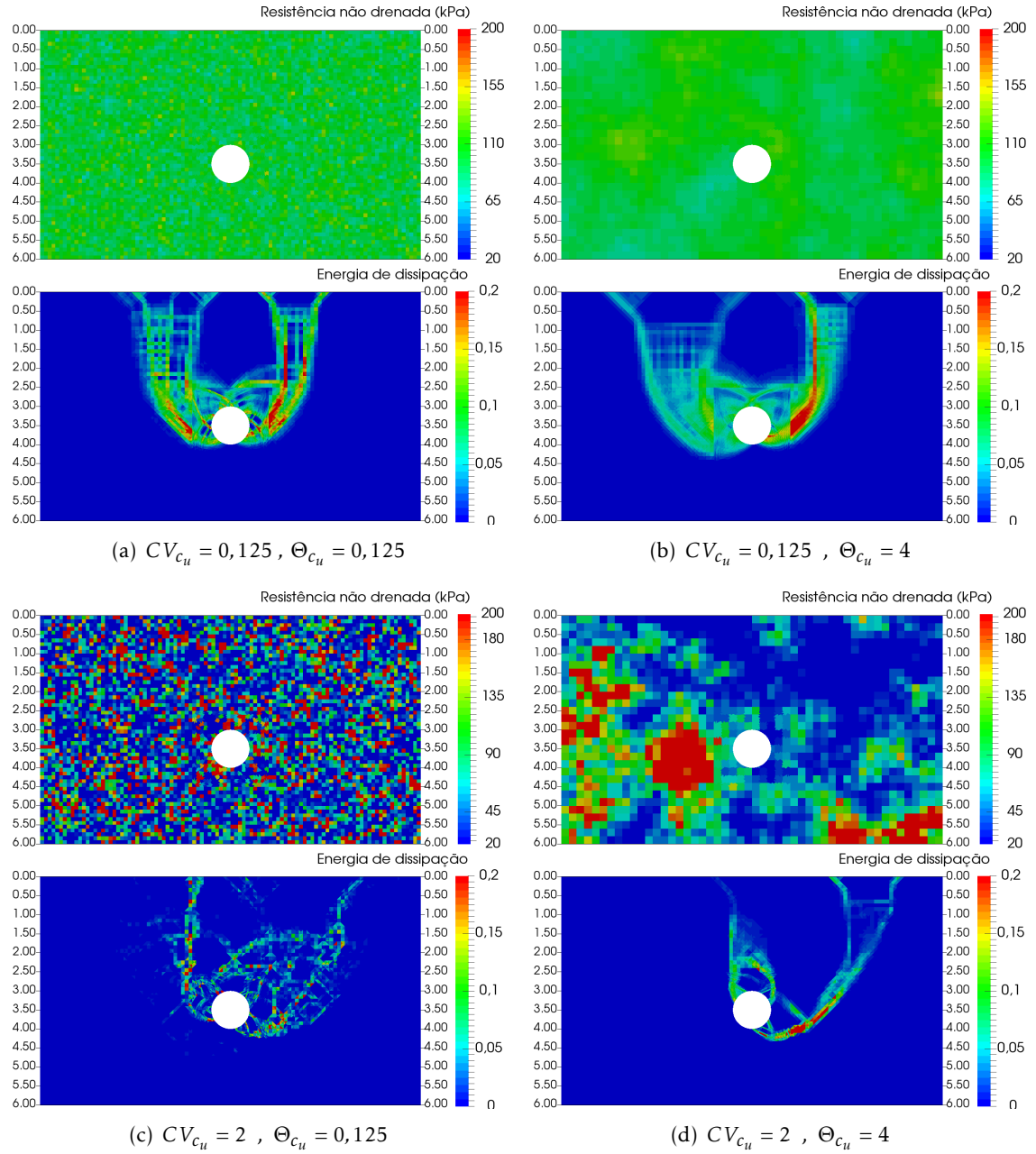


Figura 4.13: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$

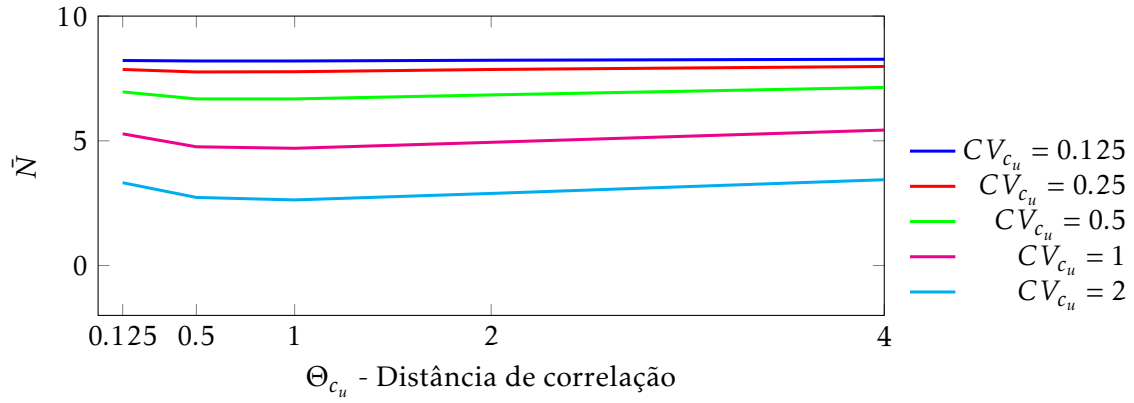


Figura 4.14: Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125;0,5;1;2\}$

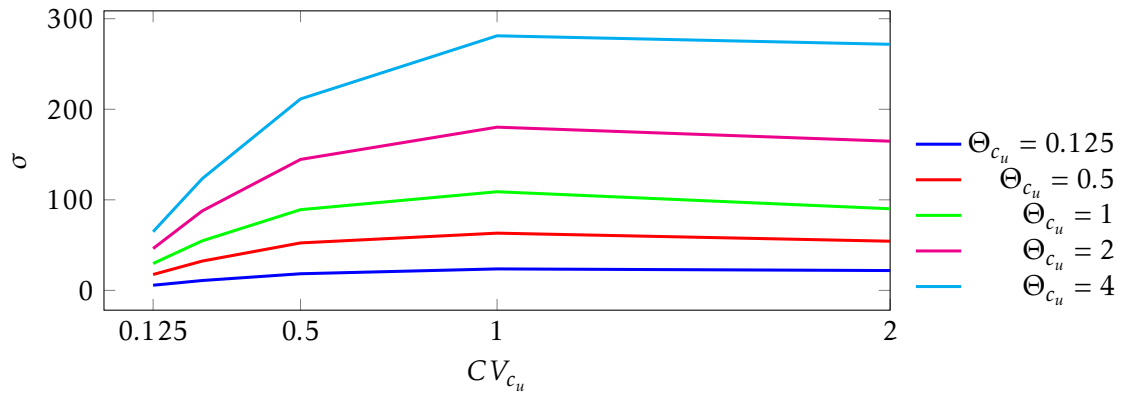


Figura 4.15: Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125;0,5;1;2\}$

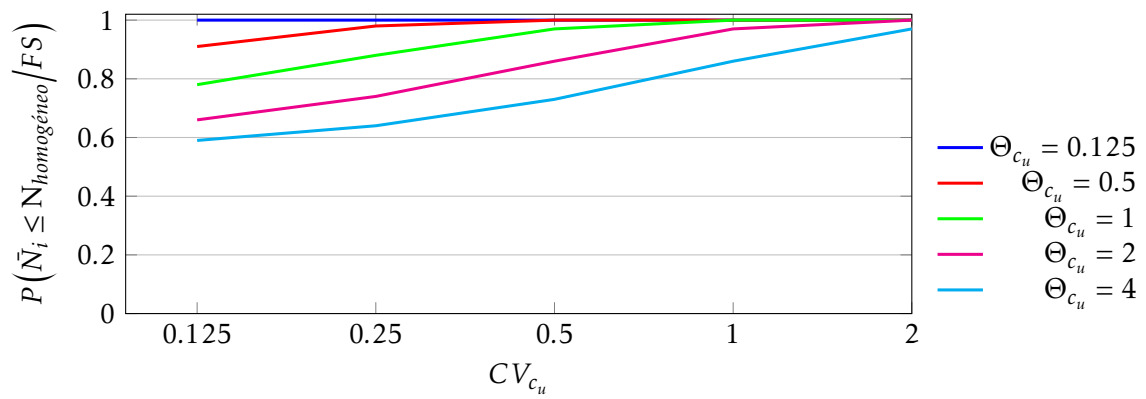


Figura 4.16: Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homogêneo}/1)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125;0,5;1;2\}$

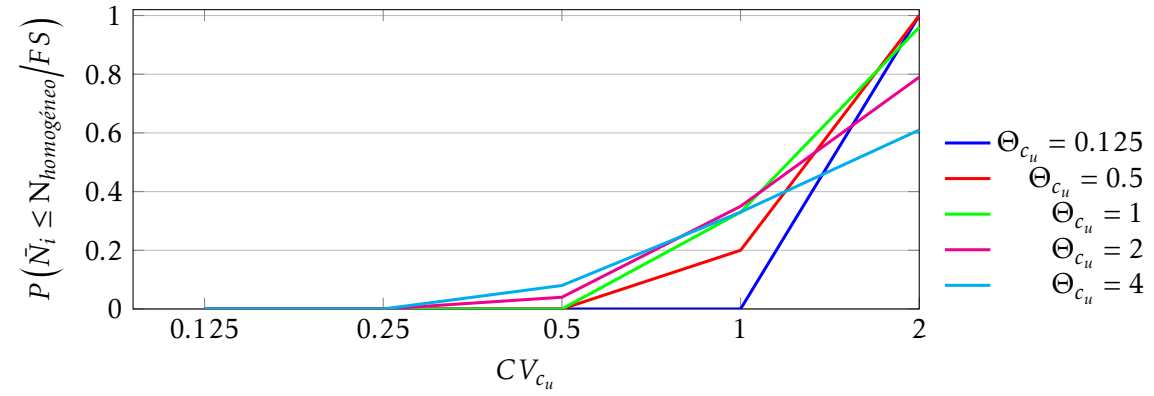


Figura 4.17: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

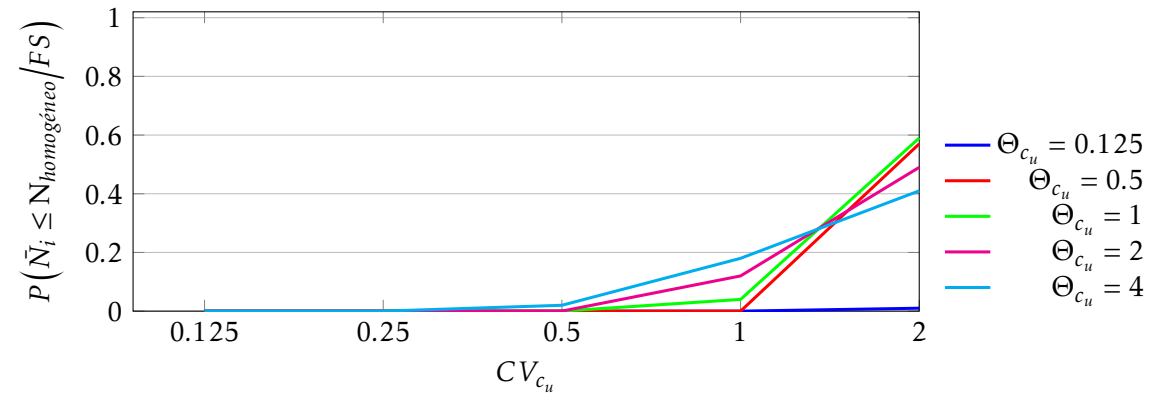


Figura 4.18: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

C/D=4

Finalmente apresentam-se os resultados da última profundidade estudada. A Figura 4.19 apresenta para a profundidade $C/D = 4$ a comparação de alguns exemplos da distribuição da resistência ao corte não drenada no maciço e os respectivos mecanismos de colapso obtidos.

Verifica-se a tendência anteriormente notada nas secções anteriores. A tendência encontra-se representada na Figura 4.20. Nesta profundidade, $C/D = 4$, encontram-se os valores mais elevados para o número de estabilidade médio.

As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 mostram a probabilidade de $P(\tilde{N}_i \leq N_{homog\acute{e}neo}/FS)$ para $C/D = 4$ e $\gamma D/c_u = 0$, com factores de segurança, FS , de 1, 2 e 3, respectivamente.

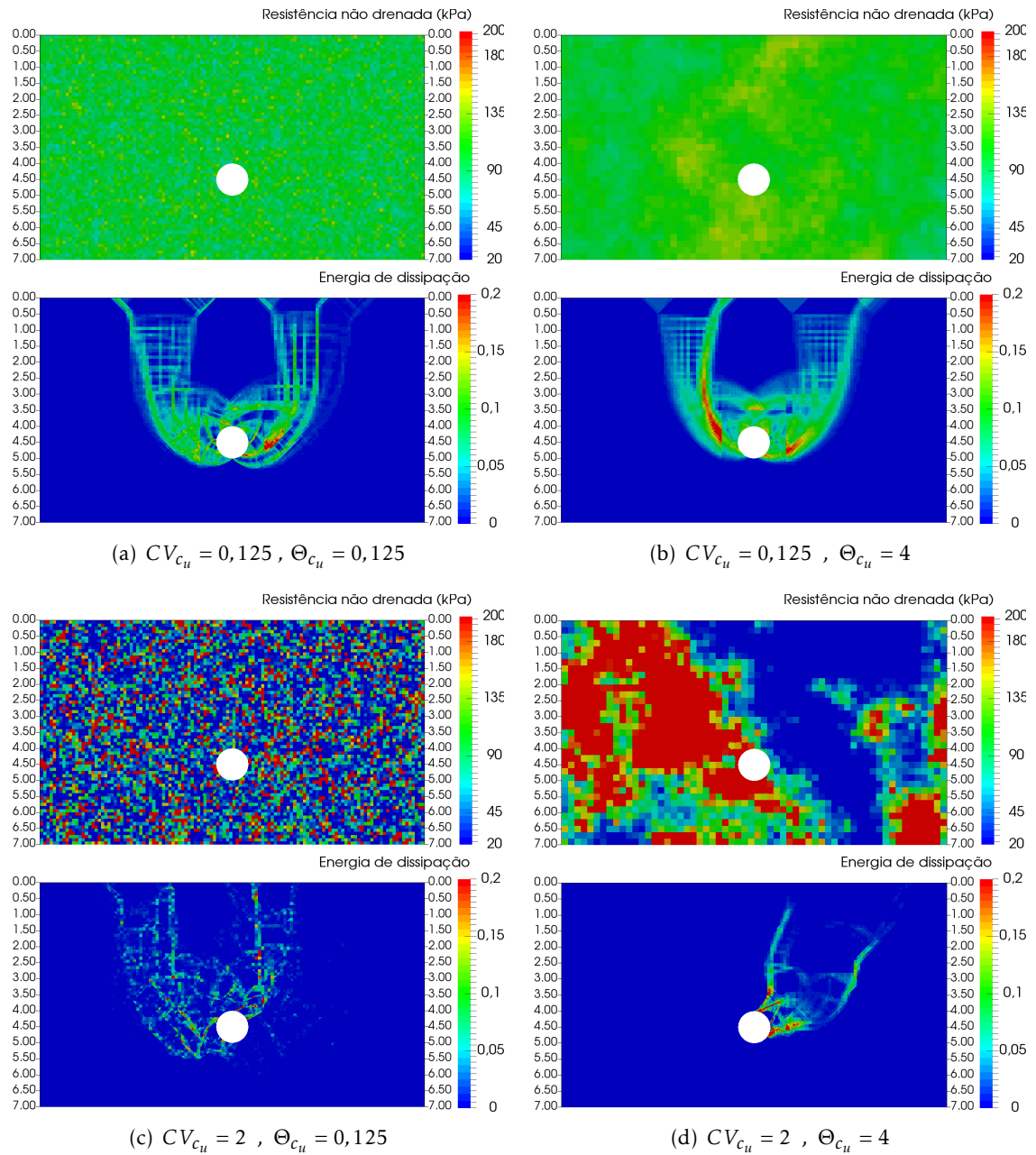


Figura 4.19: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$

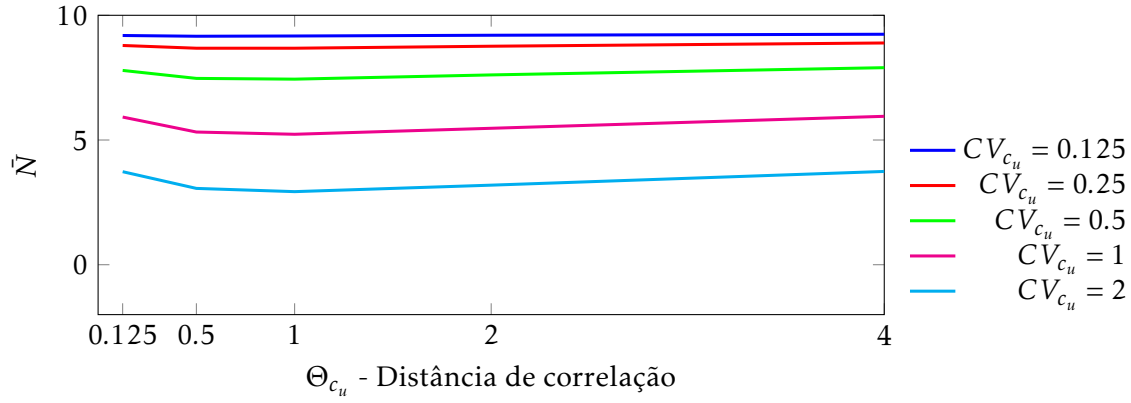


Figura 4.20: Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125;0,5;1;2\}$

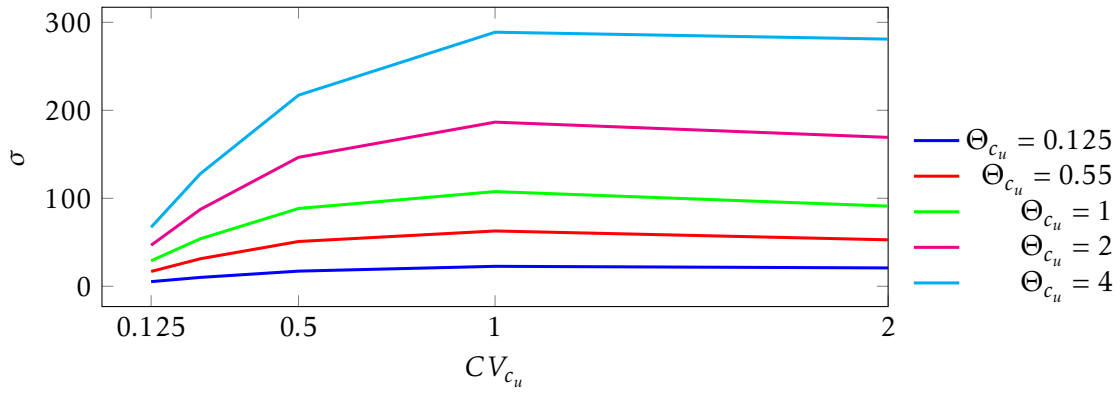


Figura 4.21: Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125;0,5;1;2\}$

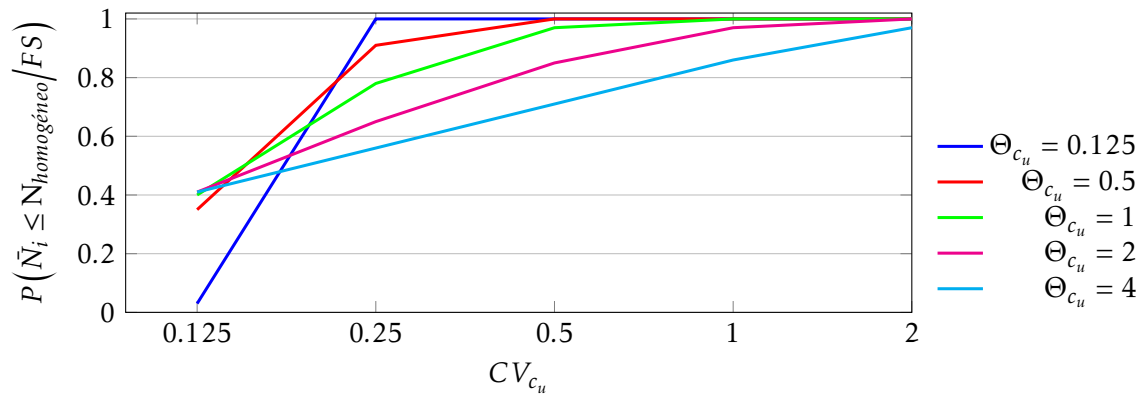


Figura 4.22: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(\tilde{N}_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125;0,5;1;2;4\}$

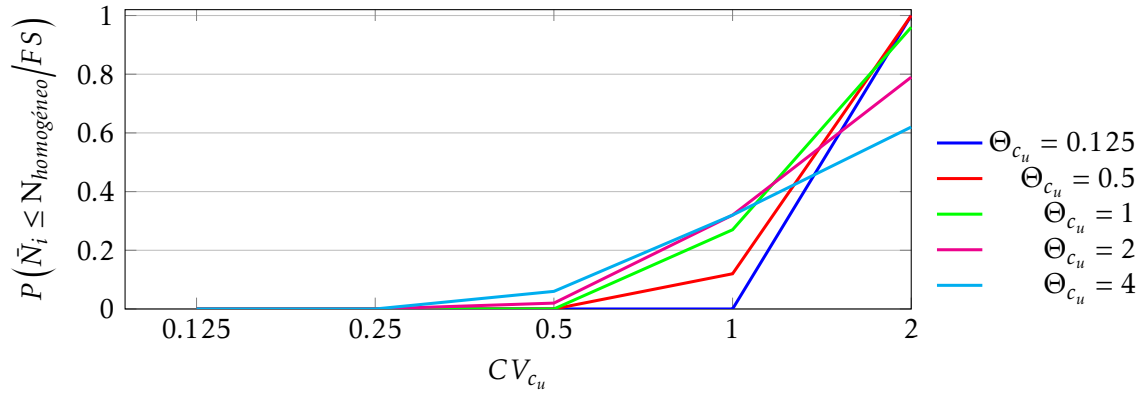


Figura 4.23: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

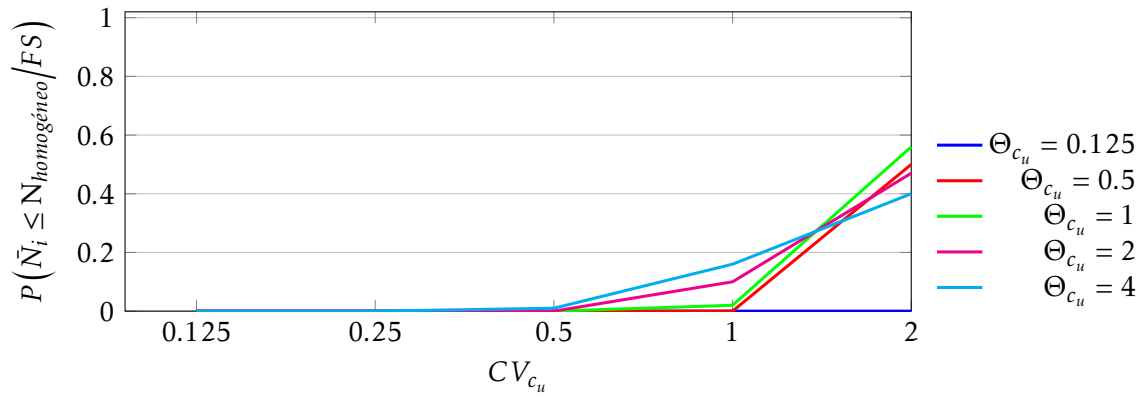


Figura 4.24: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

4.2.1 Análise dos resultados

A Figura 4.25 mostra a evolução do número de estabilidade médio para as várias profundidades, C/D , e coeficientes de variabilidade, CV_{c_u} para $\Theta_{c_u} = 0,125$, e representa graficamente a Tabela 4.2. Como se pode observar o aumento do valor do coeficiente de variabilidade traduz-se numa diminuição do número de estabilidade médio.

Tabela 4.2: Evolução do número de estabilidade médio para $C/D = \{1;2;3;4\}$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ com $\gamma D/c_u = 0$ e $\Theta_{c_u} = 0,125$

	$\gamma D/c_u$	CV_{c_u}	Θ_{c_u}	C/D			
				1	2	3	4
Z	0	Homogéneo	0,125	5.04	7.08	8.39	9.34
		0.125		4.93	6.91	8.22	9.19
		0.25		4.71	6.60	7.86	8.79
		0.5		4.15	5.83	6.96	7.79
		1		3.11	4.41	5.28	5.92
		2		1.93	2.77	3.32	3.73

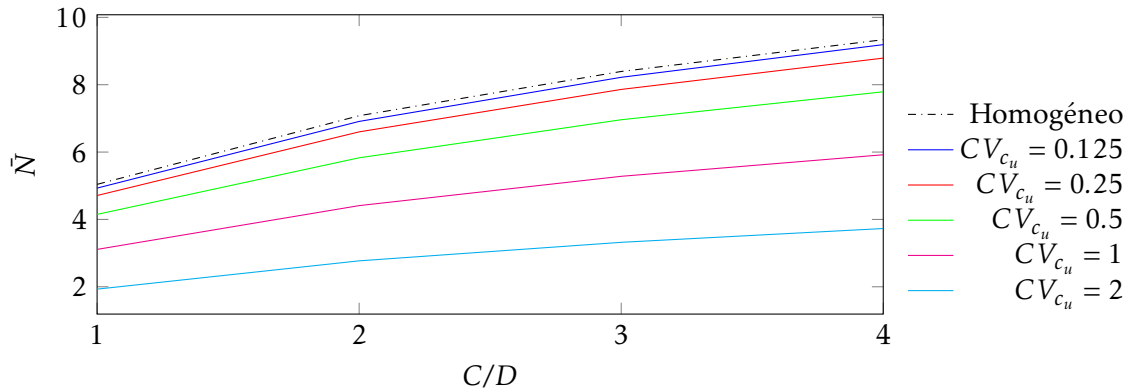


Figura 4.25: Evolução dos valores médios do número de estabilidade para o modelo homogéneo e o modelo considerando uma estrutura de correlação isotrópica em função de $C/D = \{1;2;3;4\}$ para $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\gamma D/c_u = 0$ e $\Theta_{c_u} = 0,125$

As Tabelas C.1, C.2, C.3 e C.4, apresentadas em anexo, contêm todos os resultados relativos aos números de estabilidade obtidas das combinações entre $C/D = \{1;2;3;4\}$, $\gamma D/c_u = 0$ $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125;0,5;1;2\}$.

4.3 Conclusões do capítulo

A análise dos dados obtidos e apresentados neste capítulo permitem avaliar a influência da variabilidade inerente que o solo tem sobre uma escavação de um túnel superficial.

Foi possível observar que em todos os casos o número de estabilidade médio aumenta com a profundidade, com o aumento do valor da distância de correlação espacial, Θ_{c_u} e com a diminuição do coeficiente de variabilidade, CV_{c_u} .

É de referir que o pior caso entre todas as profundidades se encontra sempre para o coeficiente de variabilidade CV_{c_u} maior, neste caso $CV_{c_u} = 2$ e entre os valores de distância de correlação espacial $\Theta_{c_u} = 0,5$ e $\Theta_{c_u} = 1$.

Quanto maior o valor de CV_{c_u} , maior a discrepância entre zonas do solo com um elevado valor de resistência e zonas do solo com um valor muito baixo de resistência não drenada. Assim, quando é atuado o carregamento à superfície, as primeiras zonas a atingirem a cedência serão as de menor valor de resistência o que por sua vez criará um mecanismo que se propagará pelo caminho de menor resistência e daí levando a que o valor da carga de colapso seja reduzido.

Os mecanismos de colapso são mais uma característica interessante deste estudo, em que se pode verificar que estes são mais semelhantes aos mecanismos clássicos de modelos de solo homogéneo quanto menor for o coeficiente de variabilidade. Os mesmos são também cada vez mais assimétricos quanto maior for o valor de CV_{c_u} . Foi referido em parágrafos anteriores desta secção que quanto maior o coeficiente de variabilidade, o maciço cederá pelo caminho de menor resistência e a isso se devem os mecanismos mais complexos apresentados para maiores valores de CV_{c_u} .

Pode-se também observar no Anexo C na secção C.2, que a tendência de andamento dos valores de desvio-padrão não é sempre no sentido de aumento deste com o aumento do valor do coeficiente de variabilidade. Existe uma pequena inversão da tendência desta dependendo do valor de Θ_{c_u} e do valor de CV_{c_u} .

As probabilidades de $P(\tilde{N}_i \leq N_{homogéneo}/FS)$ aumentam com a evolução de CV_{c_u} para valores elevados para os factores de segurança estudados, 1, 2, e 3.

Capítulo 5

Conclusão

5.1 Considerações finais

Na dissertação apresentada foi analisada a influência da variabilidade inerente das propriedades de resistência do solo respondendo em condições não drenadas na resposta probabilística da estabilidade de túneis superficiais. Para o estudo recorreu-se a uma análise do estado limite último de resistência ao carregamento vertical. Foi utilizado método do Hipercubo Latino para a modelação da resistência não drenada do solo. Com o programa **MechpyRun**, foi possível a simulação do carregamento e determinação das cargas de colapso e respectivos números de estabilidade.

O método do Hipercubo Latino consiste numa possível abordagem ao problema, no entanto exige uma elevada potência computacional para obter resultados em tempo útil. O método exige que sejam criadas um número de amostras superior ao número de variáveis aleatórias e portanto quanto mais complexo o modelo mais tempo de cálculo é necessário e portanto mais potência computacional exigida para diminuir esse mesmo tempo. Pode-se argumentar que quanto maior o número de amostras melhor será a representação probabilística no entanto com este método não é facultada a sensibilidade necessária para a decisão do número mínimo de amostras necessárias para a obtenção de um resultado aproximado, diminuindo assim significativamente o tempo de cálculo necessário.

No Capítulo 3 procedeu-se à análise do número ideal de elementos da malha estatística, chegando-se à conclusão que para a realização do estudo em tempo útil seria necessário uma conjugação de malhas estatísticas diferentes. Na Tabela 4.1 apresenta-se a conjugação das tabelas para este estudo final. No Capítulo 4 procedeu-se à avaliação da influência do coeficiente de variabilidade, da distância de correlação espacial, da capacidade resistente do solo e da profundidade da escavação do túnel.

É possível retirar deste estudo as seguintes conclusões:

- O valor médio do número de estabilidade considerando a variabilidade inerente do solo é sempre menor que o seu valor considerando a hipótese de solo homogéneo, independentemente do valor dos parâmetros de profundidade C/D , da capacidade resistente do material $\gamma D/c_u$, do coeficiente de variabilidade das propriedades de resistência do solo CV_{c_u} e da distância de correlação espacial Θ_{c_u} .
- O valor médio do número de estabilidade para um modelo de solo considerando uma estrutura de correlação isotrópica é gradualmente mais próximo do valor do modelo de solo homogéneo quanto maior o valor da distância de correlação espacial.
- A diminuição do valor do coeficiente de variabilidade traduz uma maior aproximação do valor médio do número de estabilidade do modelo considerando uma estrutura de correlação isotrópica ao modelo de solo homogéneo.

Outro facto que é possível retirar deste estudo embora não relacionado diretamente com os parâmetros em análise é o facto de que, tal como esperado e já sabido, o aumento da profundidade do túnel implica um aumento do número de estabilidade para ambos os modelos, homogéneo e heterogéneo.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Possíveis desenvolvimentos futuros de investigação da variabilidade inerente das propriedades do solo em túneis superficiais, deverão ser analisados:

- Influência da anisotropia relacionada com a deposição estratigráfica dos materiais geológicos.
- Influência do efeito tridimensional na estabilidade dos túneis e comparação deste com os resultados obtidos neste estudo.

Bibliografia

- Broms, B. B. e Bennermark, H. (1967). "Stability of clay in vertical openings." Em: *Journal of soil mechanics and foundations division America society of civil engineering*, Vol. 193, No. 1, pp. 71–94.
- Chiasson, P., Lafleur, J., Soulié, M. e Law, K. T. (1995). "Characterizing spatial variability of a clay by geostatistics". Em: *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, pp. 1–10.
- Griffiths, D. V. e Fenton, G. A. (2001). "Bearing capacity of spatially random soil: the undrained clay Prandtl problem revisited". Em: *Géotechnique*, Vol. 51, No. 4, pp. 351–359.
- Phoon, K. e Kulhawy, F. H. (1999). "Characterization of geotechnical variability". Em: *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, pp. 612–624.
- Salgueiro, A. P. H. B. (2010). "Aplicação do teorema cinemático da análise limite ao cálculo da estabilidade de túneis escavados em solos em condições não drenadas". MSc. Faculdade de Ciência e Tecnologias de Universidade Nova de Lisboa.
- Silva, M. J. V. (2009). "Implementação Numérica Tridimensional do Teorema Cinemático da Análise Limite". PhD. Lisboa: Faculdade de Ciência e Tecnologias de Universidade Nova de Lisboa.
- Simões, J. T. R. B. S. R. (2012). "Avaliação da Resposta Probabilística de Fundações Superficiais". MSc. Faculdade de Ciência e Tecnologias de Universidade Nova de Lisboa.
- Sloan, S. W. e Assadi, A. (1993). "Stability of shallow tunnels in soft ground." Em: *Predictive soil mechanics. Thomas Telford*, pp. 644–662.
- Vanmarcke, E. (1983). *Random Fields: Analysis and Synthesis*. Third Edition. Cambridge, Massachussets: The MIT press.
- Wood, D. M. (2004). *Geotechnical Modelling*. London e New York: Spon Press.

Apêndice A

Modelação Numérica de Túneis Superficiais

Neste apêndice são apresentadas as malhas de elementos finitos escolhidas para o estudo do problema em análise para as profundidades $C/D = 1$, $C/D = 2$, $C/D = 3$ e $C/D = 4$.

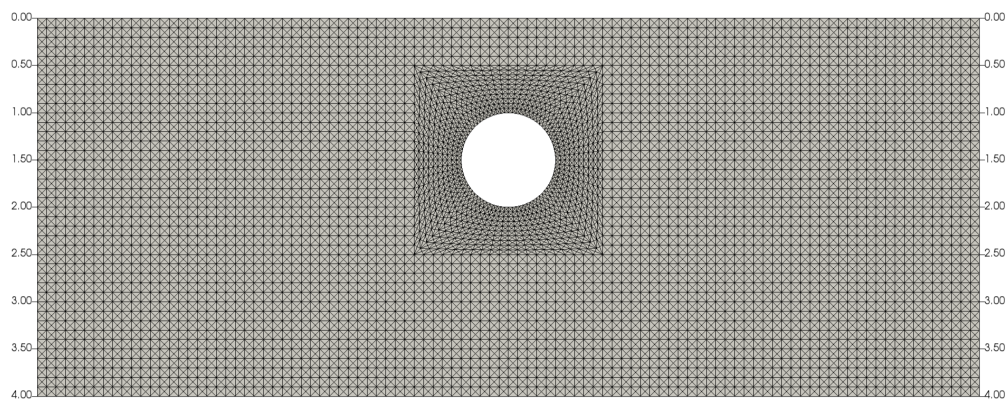


Figura A.1: Malha de elementos finitos do modelo bidimensional na profundidade $C/D = 1$.

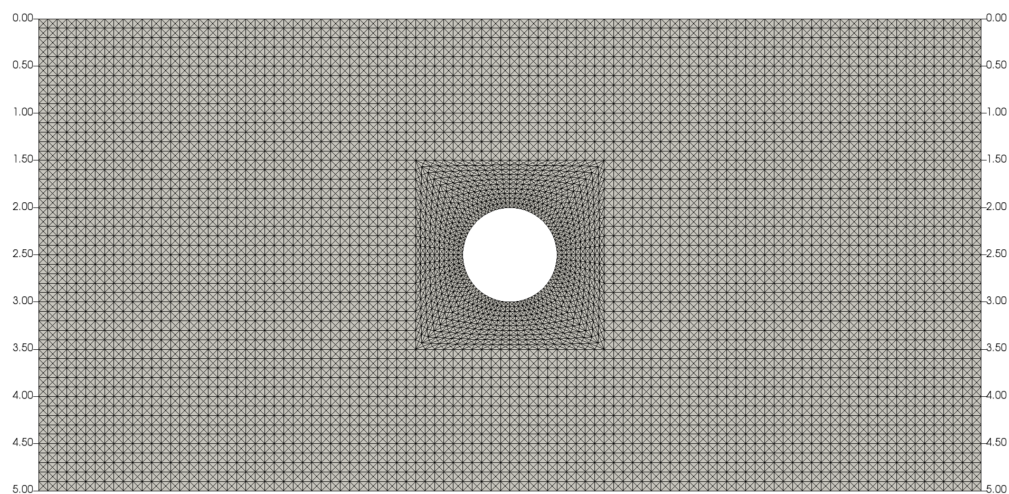


Figura A.2: Malha de elementos finitos do modelo bidimensional na profundidade $C/D = 2$.

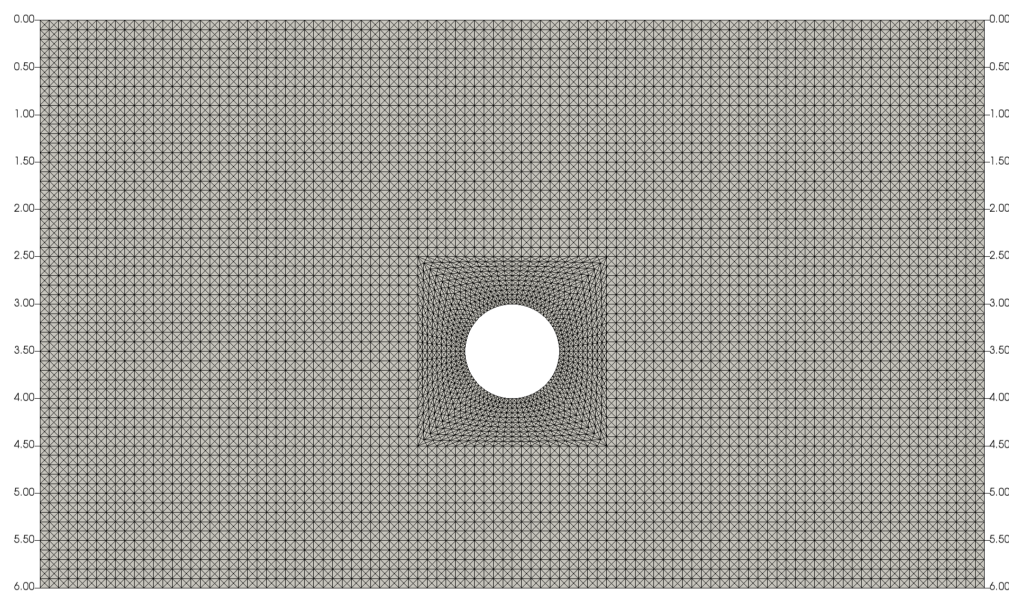


Figura A.3: Malha de elementos finitos do modelo bidimensional na profundidade $C/D = 3$.

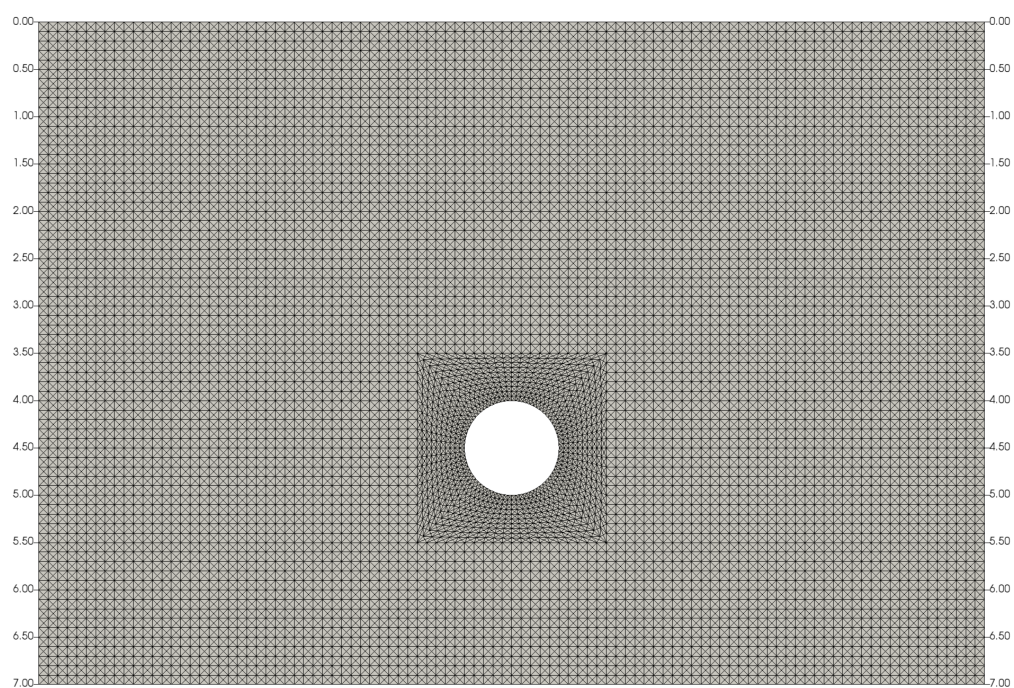
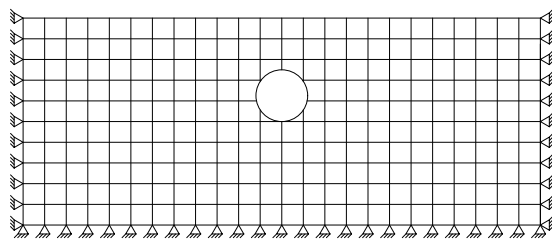


Figura A.4: Malha de elementos finitos do modelo bidimensional na profundidade $C/D = 4$.

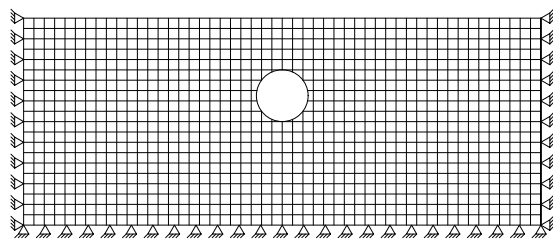
Apêndice B

Influência da malha estatística

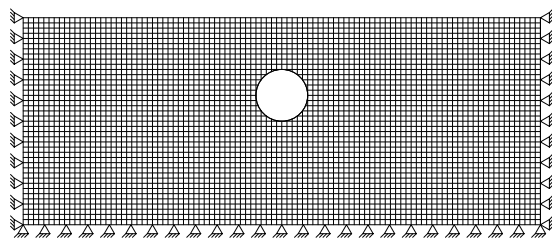
B.1 Malhas estatísticas estudadas



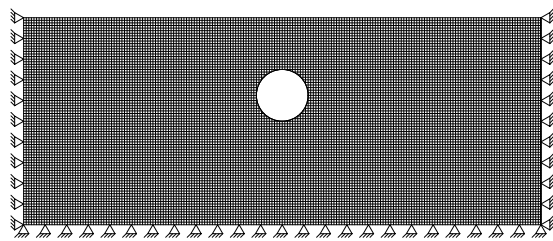
(a) Malha Estatística 24×10



(b) Malha Estatística 50×20



(c) Malha Estatística 100×40



(d) Malha Estatística 200×80

Figura B.1: Malhas estatísticas estudadas à profundidade $C/D = 1$

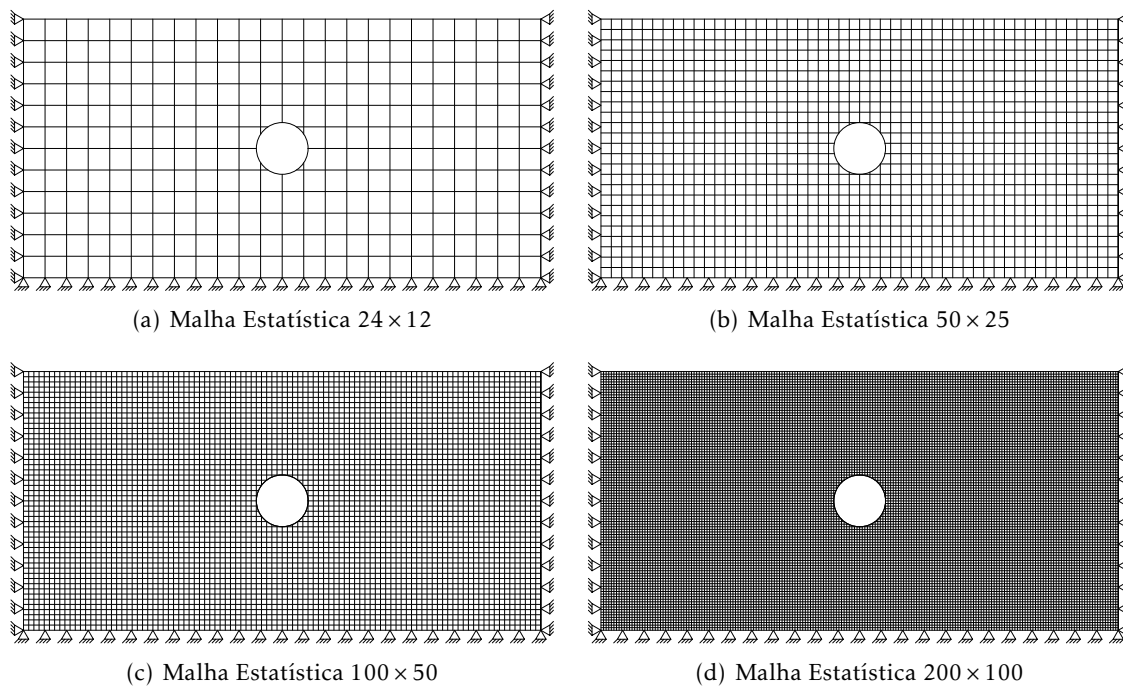


Figura B.2: Malhas estatísticas estudadas à profundidade $C/D = 2$

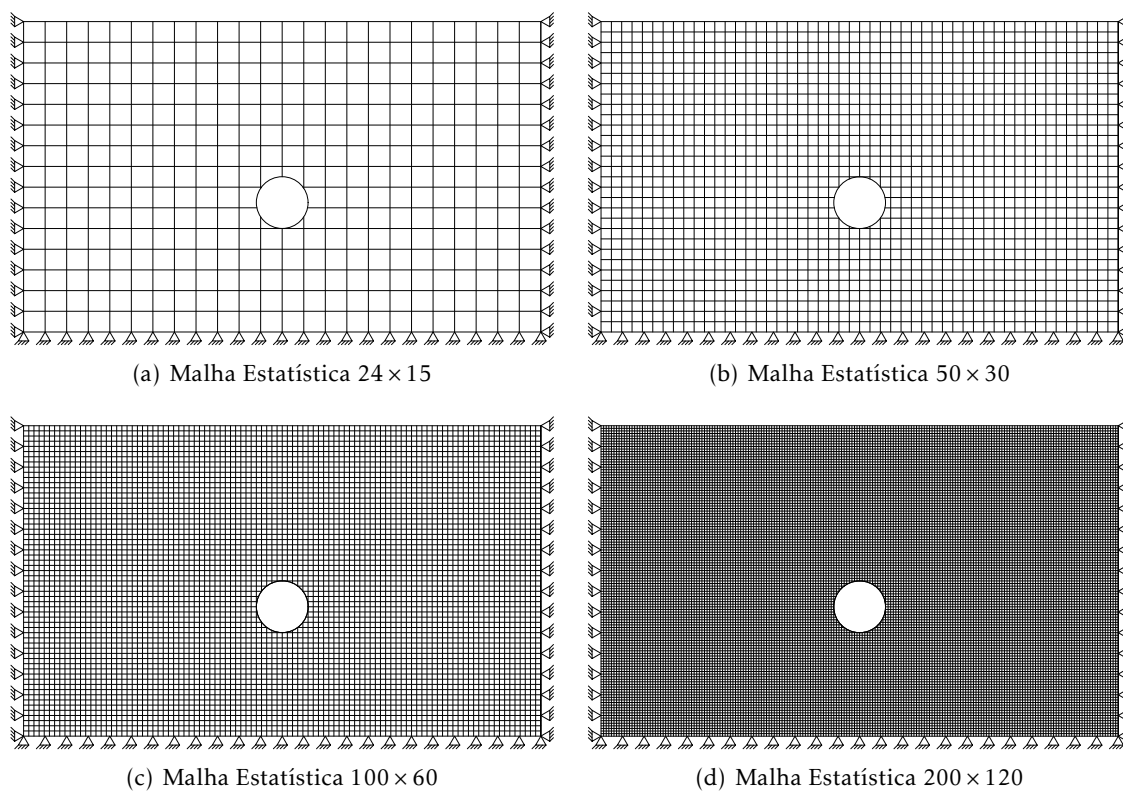
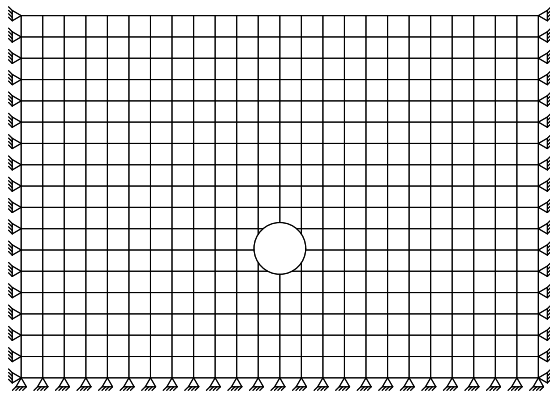
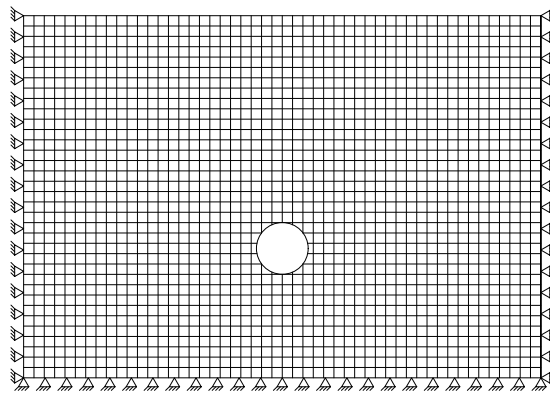
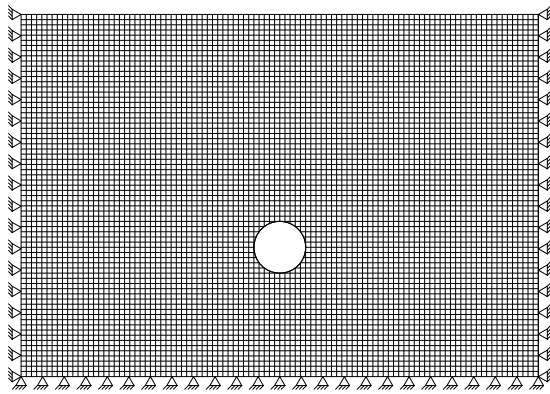
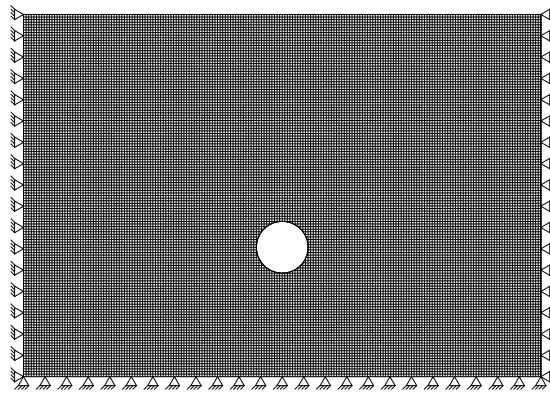
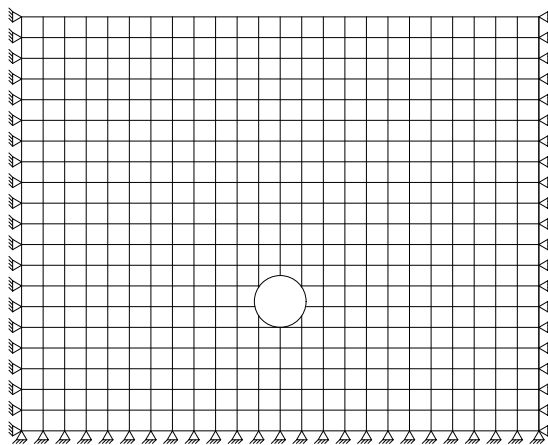
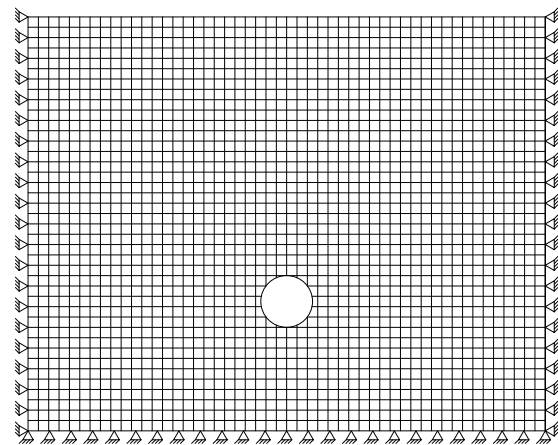
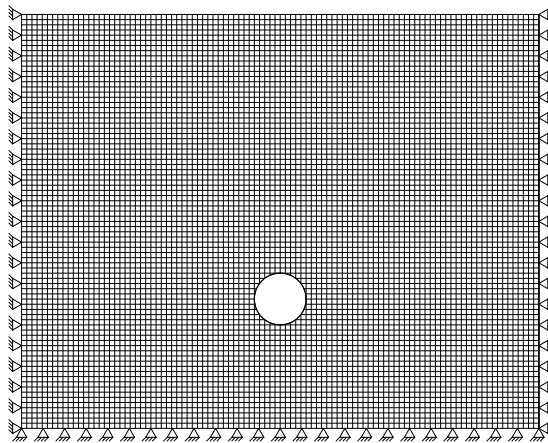
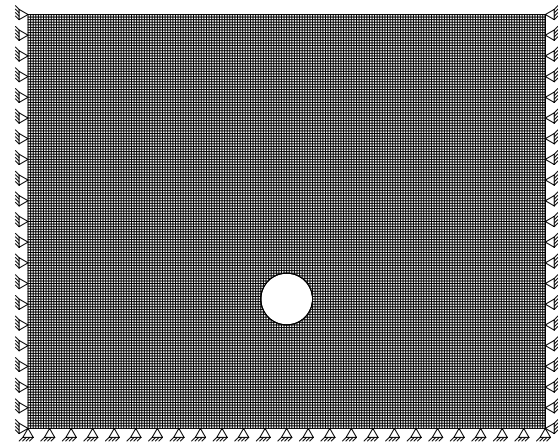


Figura B.3: Malhas estatísticas estudadas à profundidade $C/D = 3$

(a) Malha Estatística 24×17 (b) Malha Estatística 50×35 (c) Malha Estatística 100×70 (d) Malha Estatística 200×140 Figura B.4: Malhas estatísticas estudadas à profundidade $C/D = 4$

(a) Malha Estatística 24×20 (b) Malha Estatística 50×40 (c) Malha Estatística 100×80 (d) Malha Estatística 200×160 Figura B.5: Malhas estatísticas estudadas à profundidade $C/D = 5$

B.2 Estrutura de correlação espacial

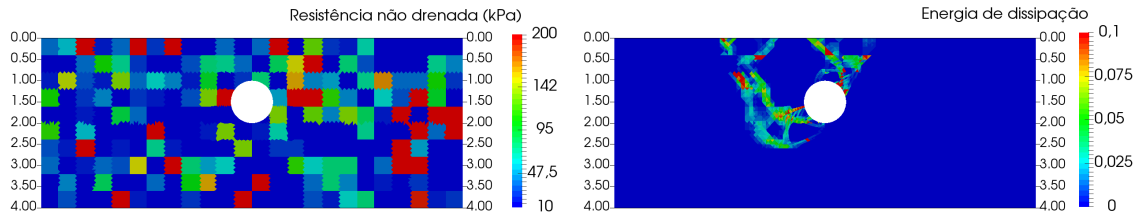
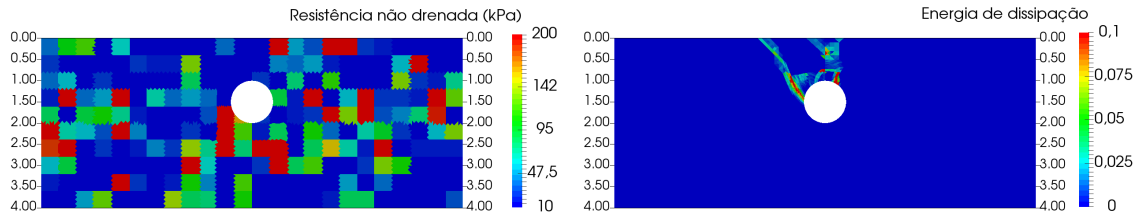
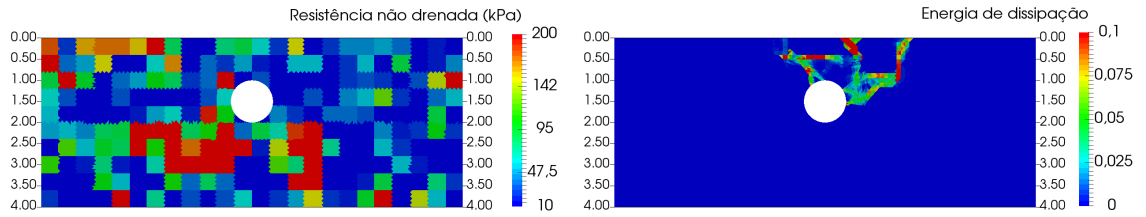
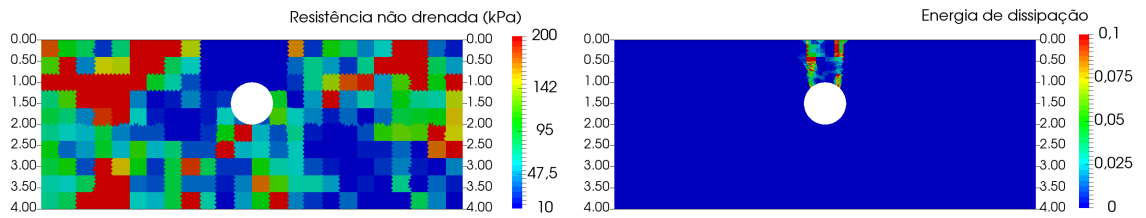
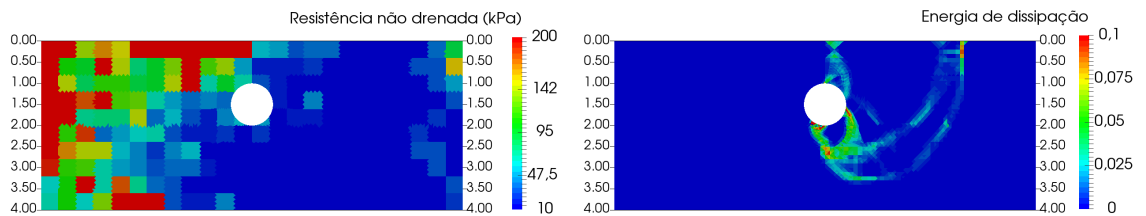
(a) $\Theta_{c_u} = 0,125$ (b) $\Theta_{c_u} = 0,5$ (c) $\Theta_{c_u} = 1$ (d) $\Theta_{c_u} = 2$ (e) $\Theta_{c_u} = 4$

Figura B.6: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 4$ correspondentes à malha estatística $24D \times 10D$

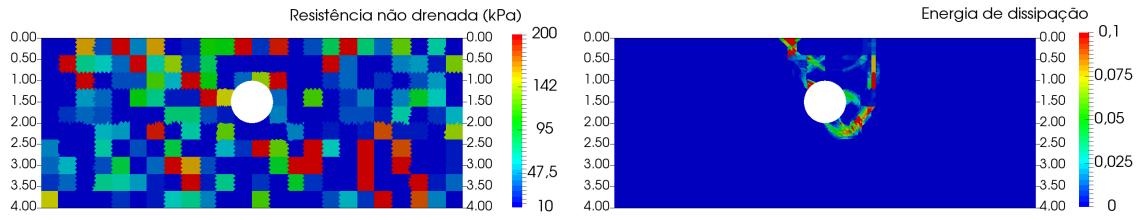
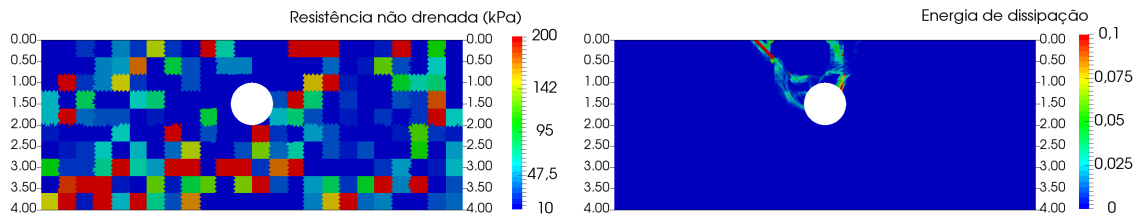
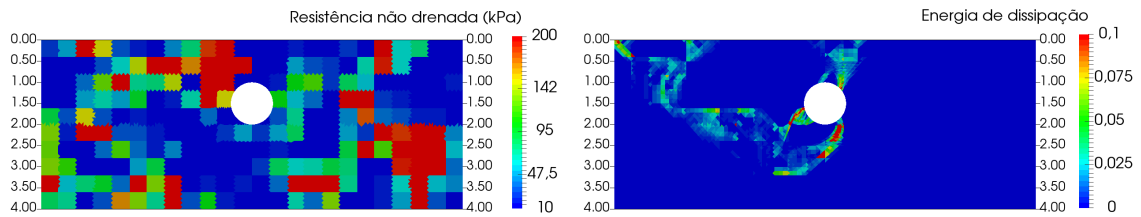
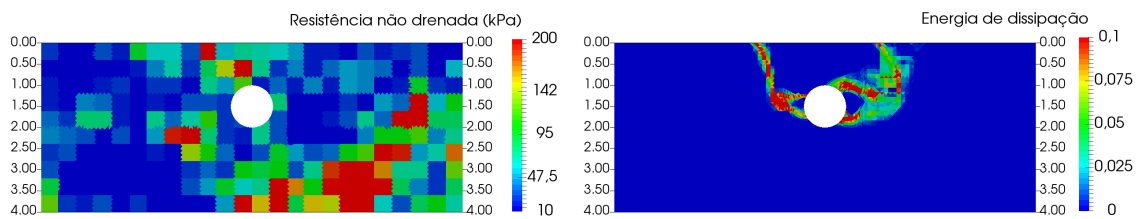
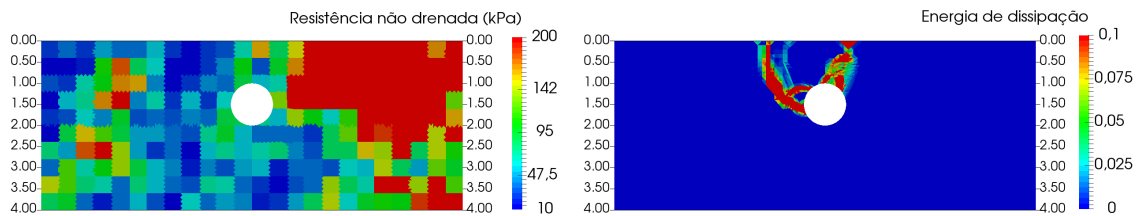
(a) $\Theta_{c_u} = 0,125$ (b) $\Theta_{c_u} = 0,5$ (c) $\Theta_{c_u} = 1$ (d) $\Theta_{c_u} = 2$ (e) $\Theta_{c_u} = 4$

Figura B.7: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 3$ e $CV_{c_u} = 4$ correspondentes à malha estatística $24D \times 10D$

Apêndice C

Estudo da influência dos parâmetros geométricos e de resistência no problema da estabilidade dos túneis

C.1 Tabelas de resultados

APÊNDICE C. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E DE RESISTÊNCIA NO PROBLEMA DA ESTABILIDADE DOS TÚNEIS

C/D=1

Tabela C.1: C/D=1

C/D	CV_{c_u}	Θ_{c_u}	N	
			$\gamma D/c_u = 0$	$\gamma D/c_u = 1$
1	Homogéneo		5.04	4.18
	0,125	0,125	4.93	4.07
		0,5	4.92	4.05
		1	4.93	4.06
		2	4.96	4.09
		4	4.98	4.11
	0,25	0,125	4.71	3.84
		0,5	4.68	3.78
		1	4.70	3.80
		2	4.78	3.87
		4	4.86	3.96
	0,5	0,125	4.15	3.26
		0,5	4.02	3.09
		1	4.07	3.11
		2	4.24	3.26
		4	4.47	3.49
	1	0,125	3.11	2.19
		0,5	2.84	1.84
		1	2.88	1.82
		2	3.14	2.04
		4	3.55	2.44
	2	0,125	1.93	0.95
		0,5	1.61	0.49
		1	1.63	0.42
		2	1.90	0.62
		4	2.36	1.06

C/D=2

Tabela C.2: C/D=2

C/D	CV_{c_u}	Θ_{c_u}	N	
			$\gamma D/c_u = 0$	$\gamma D/c_u = 1$
2	Homogéneo		7.06	5.02
	0,125	0,125	6.91	4.58
		0,5	6.90	4.60
		1	6.91	4.65
		2	6.93	4.72
		4	6.97	4.81
	0,25	0,125	6.60	4.43
		0,5	6.53	4.37
		1	6.56	4.42
		2	6.64	4.55
		4	6.75	4.72
	0,5	0,125	5.83	3.71
		0,5	5.62	3.45
		1	5.64	3.49
		2	5.81	3.71
		4	6.08	4.08
	1	0,125	4.41	2.19
		0,5	4.00	1.66
		1	3.97	1.63
		2	4.24	1.93
		4	4.72	2.50
	2	0,125	2.77	0.36
		0,5	2.28	-0.27
		1	2.23	-0.37
		2	2.48	-0.06
		4	3.04	0.56

APÊNDICE C. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E DE RESISTÊNCIA NO PROBLEMA DA ESTABILIDADE DOS TÚNEIS

C/D=3

Tabela C.3: C/D=3

C/D	CV_{c_u}	Θ_{c_u}	N	
			$\gamma D/c_u = 0$	$\gamma D/c_u = 1$
3	Homogéneo		8.39	5.25
	0,125	0,125	8.22	5.09
		0,5	8.20	5.06
		1	8.20	5.06
		2	8.23	5.09
		4	8.27	5.13
	0,25	0,125	7.86	4.73
		0,5	7.76	4.62
		1	7.77	4.62
		2	7.86	4.70
		4	7.98	4.82
	0,5	0,125	6.96	3.81
		0,5	6.68	3.51
		1	6.68	3.49
		2	6.84	3.64
		4	7.14	3.93
	1	0,125	5.28	2.10
		0,5	4.76	1.54
		1	4.70	1.46
		2	4.94	1.67
		4	5.43	2.14
	2	0,125	3.32	0.09
		0,5	2.73	-0.56
		1	2.63	-0.70
		2	2.89	-0.47
		4	3.44	0.05

C/D=4

Tabela C.4: C/D=4

C/D	CV_{c_u}	Θ_{c_u}	N	
			$\gamma D/c_u = 0$	$\gamma D/c_u = 1$
4	Homogéneo		9.38	4.91
	0,125	0,125	9.19	5.00
		0,5	9.16	4.97
		1	9.17	4.97
		2	9.20	5.00
		4	9.24	5.05
	0,25	0,125	8.79	4.60
		0,5	8.68	4.47
		1	8.68	4.47
		2	8.76	4.55
		4	8.89	4.68
	0,5	0,125	7.79	3.58
		0,5	7.47	3.25
		1	7.44	3.21
		2	7.61	3.36
		4	7.90	3.65
	1	0,125	5.92	1.68
		0,5	5.32	1.06
		1	5.23	0.95
		2	5.47	1.17
		4	5.95	1.63
	2	0,125	3.73	-0.56
		0,5	3.06	-1.27
		1	2.93	-1.43
		2	3.19	-1.20
		4	3.74	-0.67

C.2 Representação gráfica dos resultados

$C/D=1$

C.2.0.1 $\gamma D/c_u = 0$

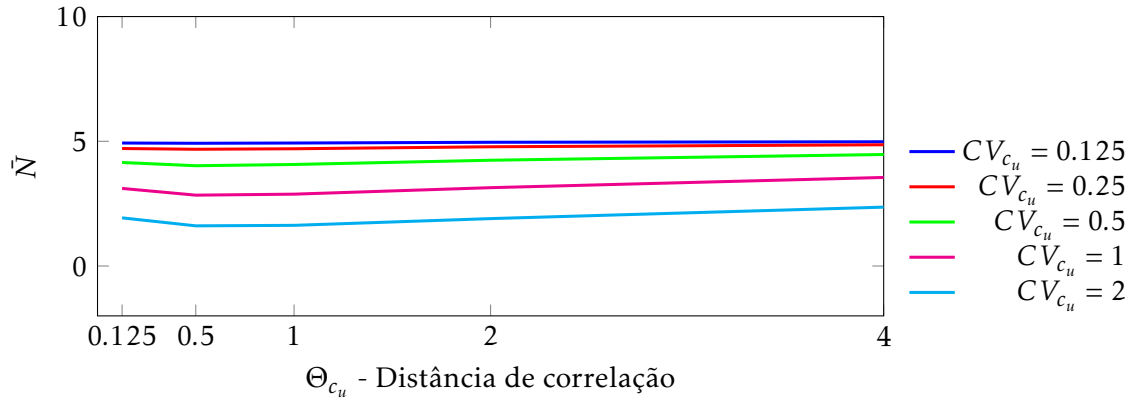


Figura C.1: Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

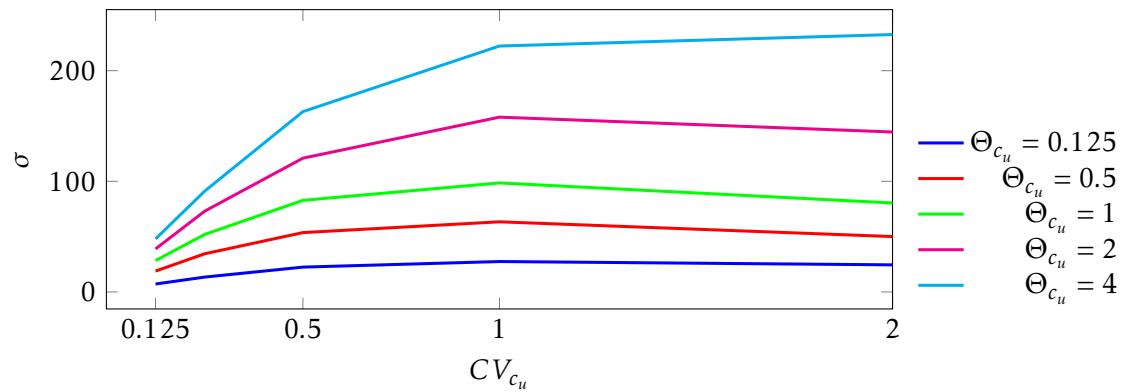


Figura C.2: Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

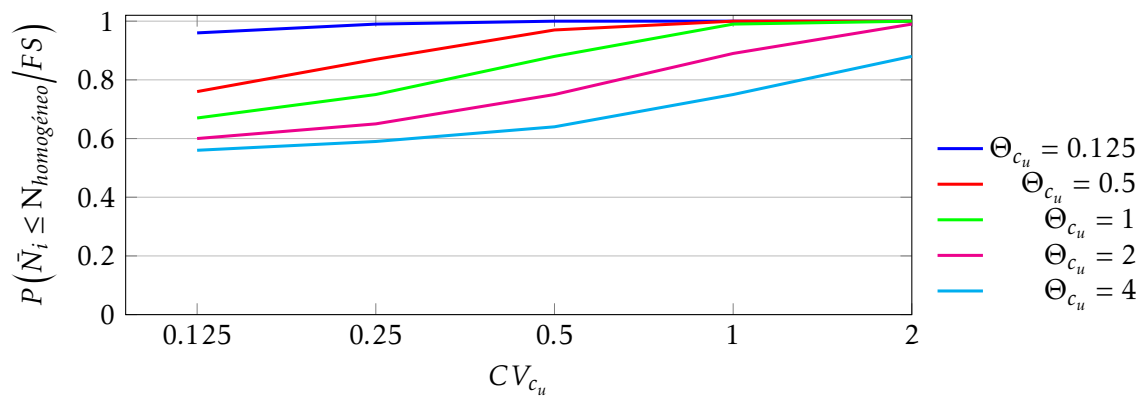


Figura C.3: Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

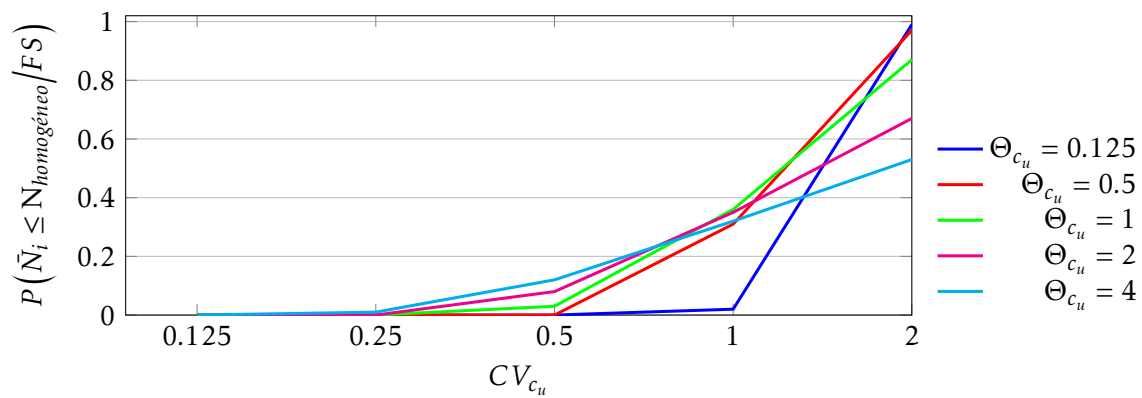


Figura C.4: Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

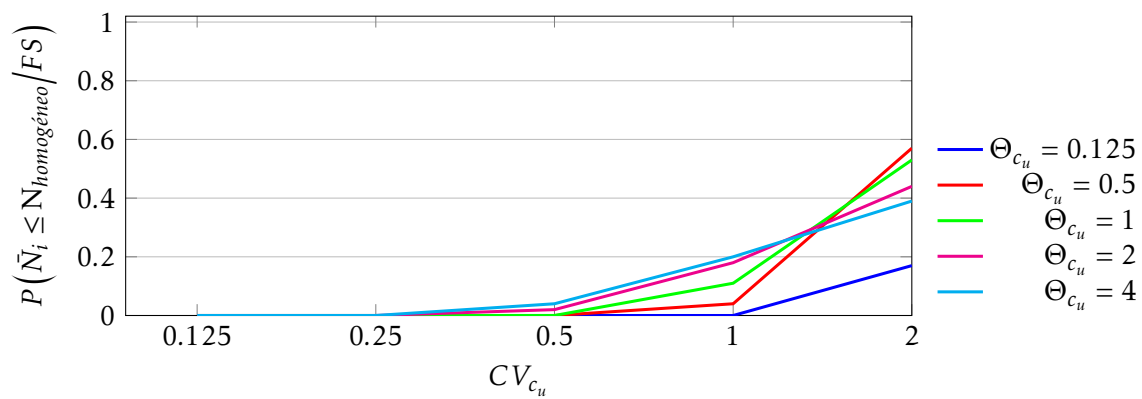


Figura C.5: Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

C.2.0.2 $\gamma D/c_u = 1$

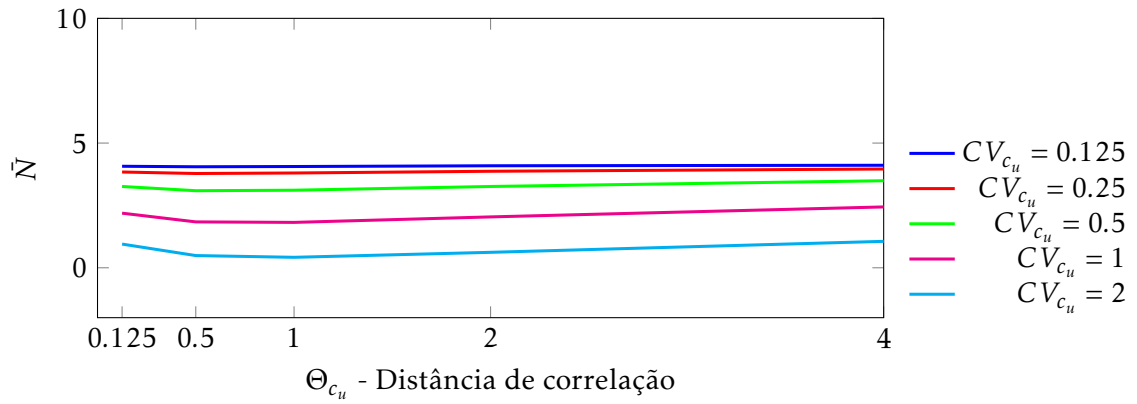


Figura C.6: Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125;0,5;1;2\}$

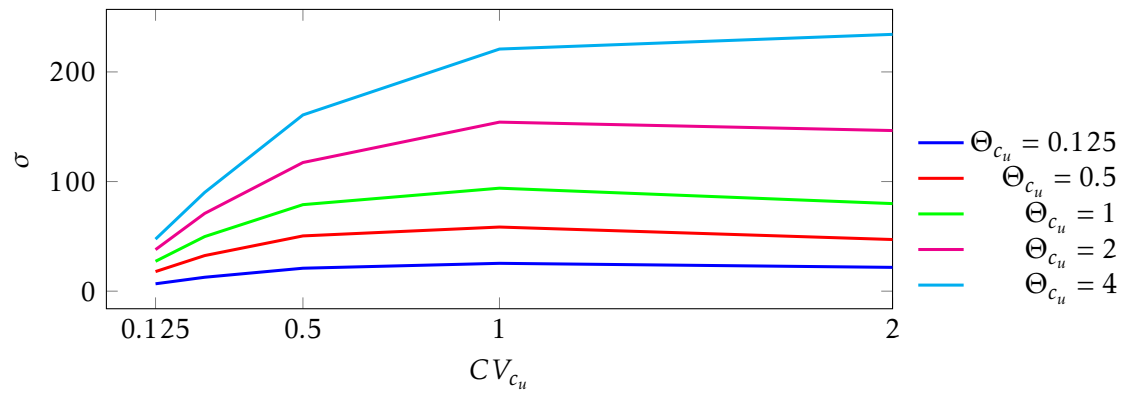


Figura C.7: Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125;0,5;1;2\}$

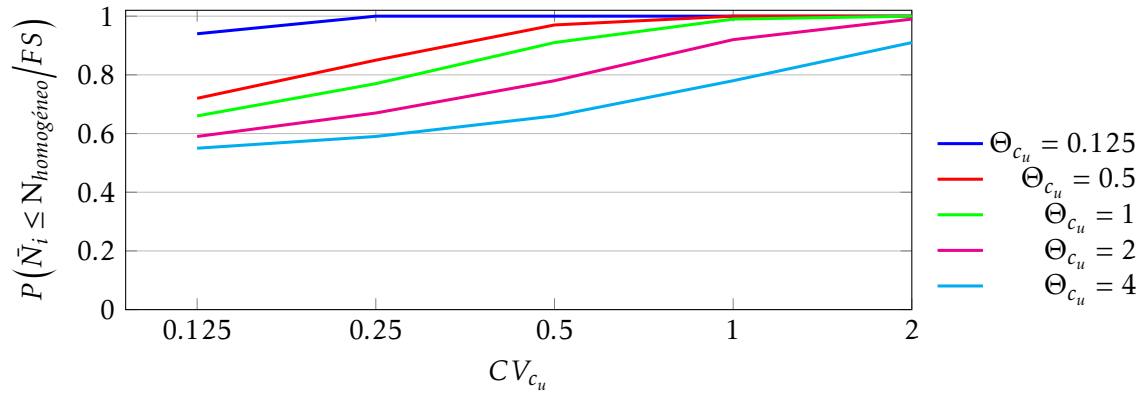


Figura C.8: Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

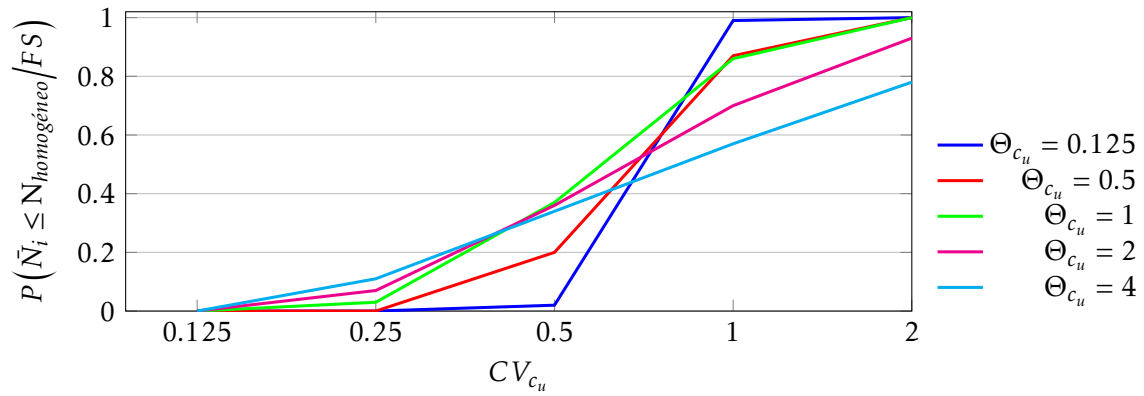


Figura C.9: Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

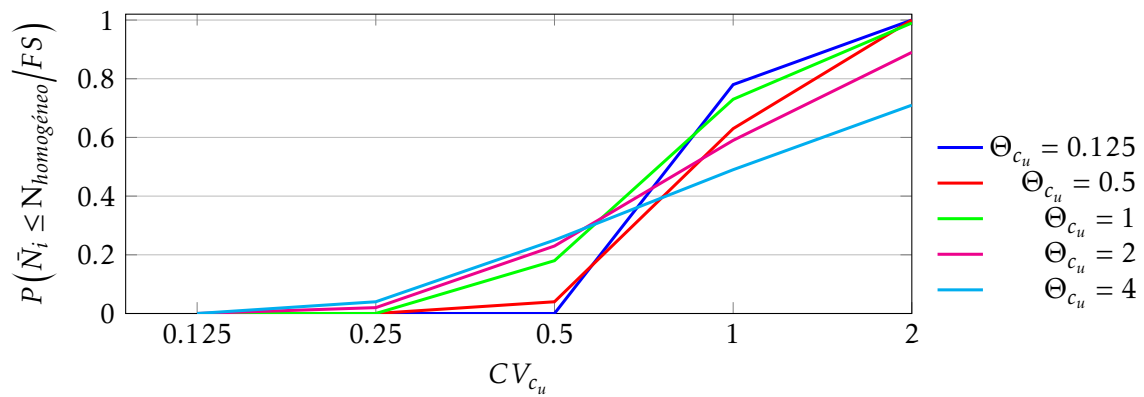


Figura C.10: Probabilidade de \bar{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

$C/D=2$

C.2.0.3 $\gamma D/c_u = 0$

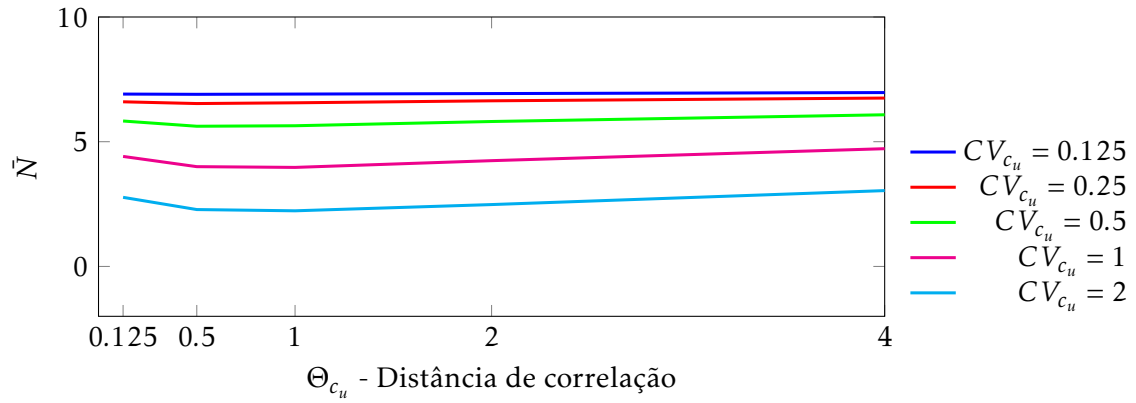


Figura C.11: Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

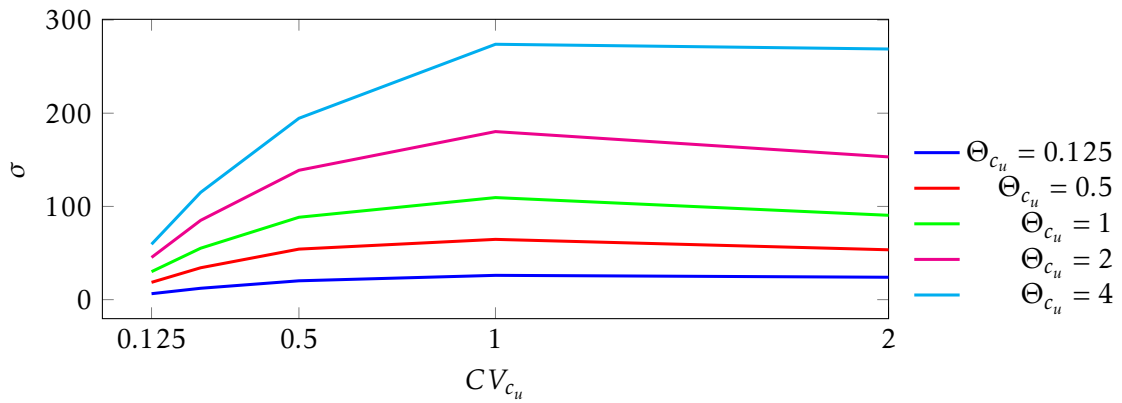


Figura C.12: Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

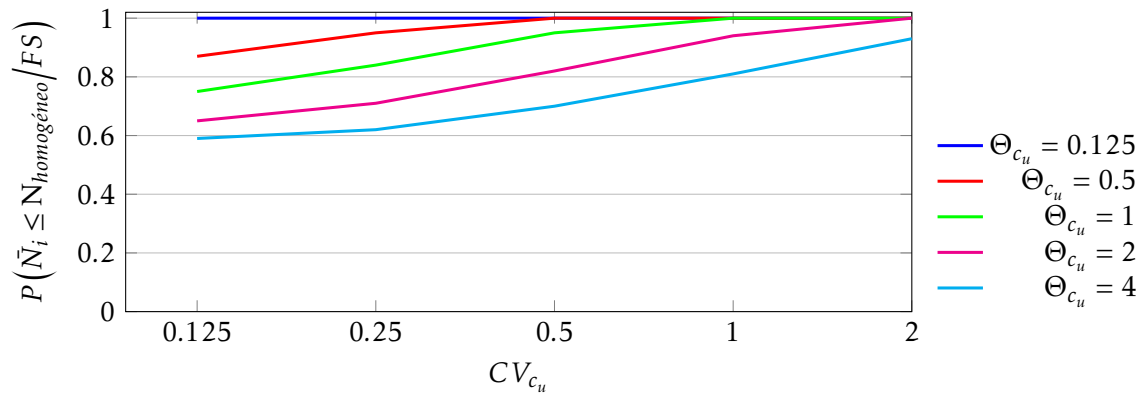


Figura C.13: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

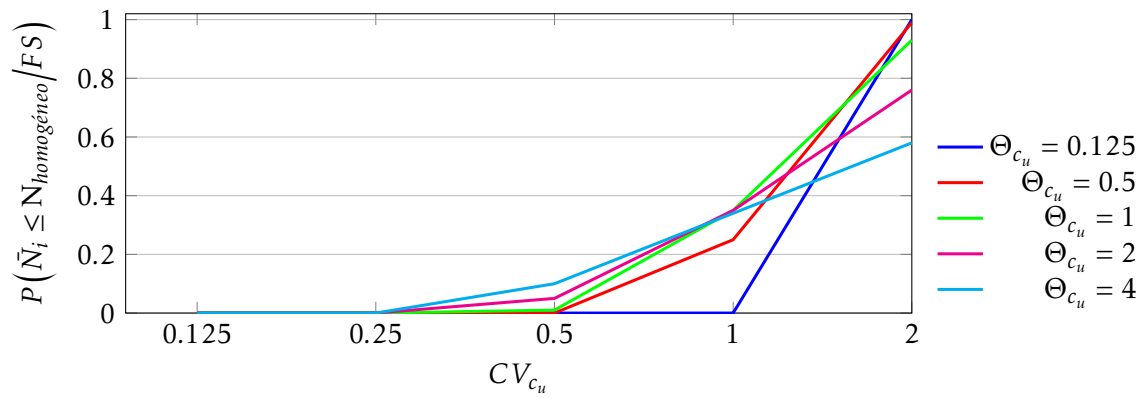


Figura C.14: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

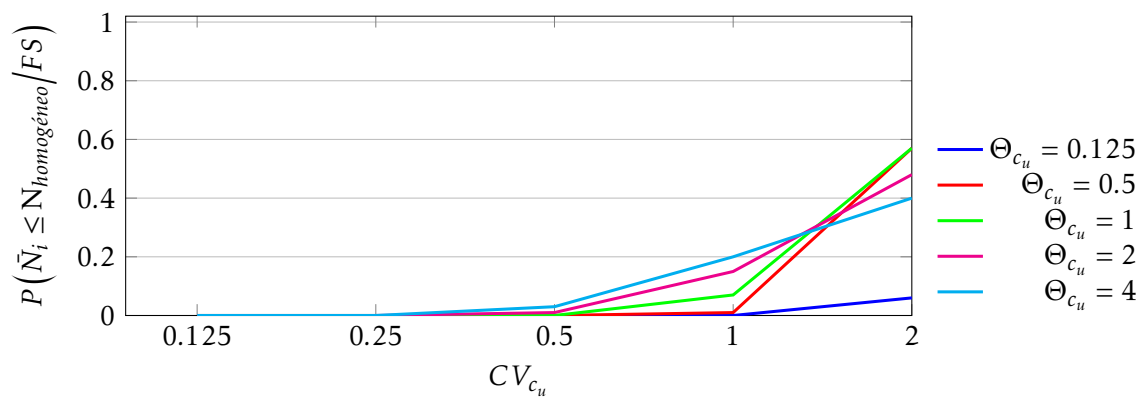


Figura C.15: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

C.2.0.4 $\gamma D/c_u = 1$

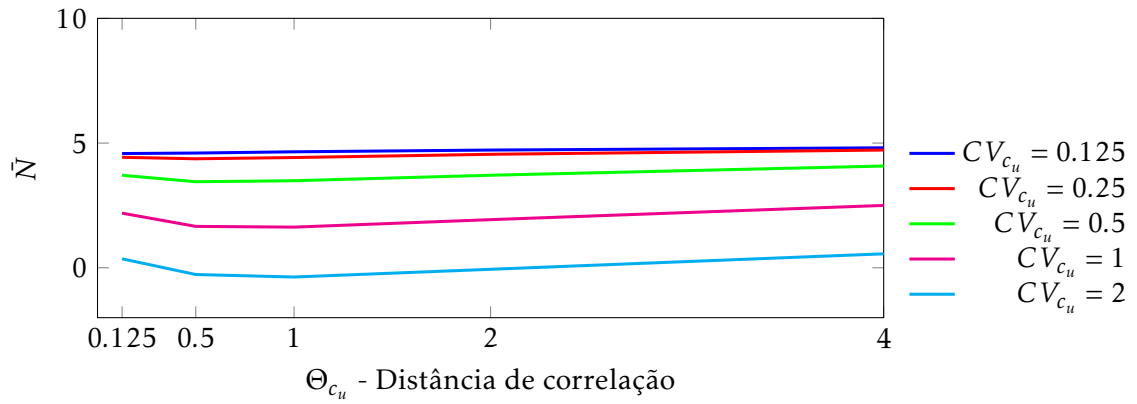


Figura C.16: Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

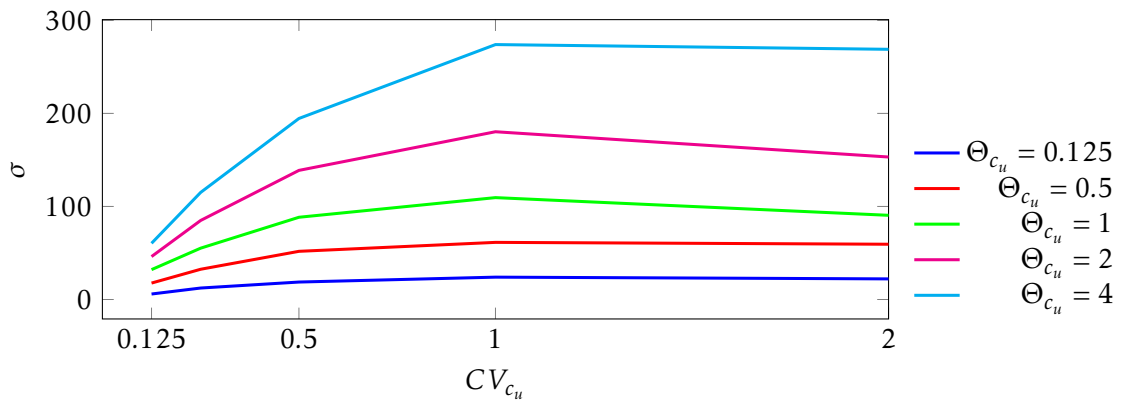


Figura C.17: Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

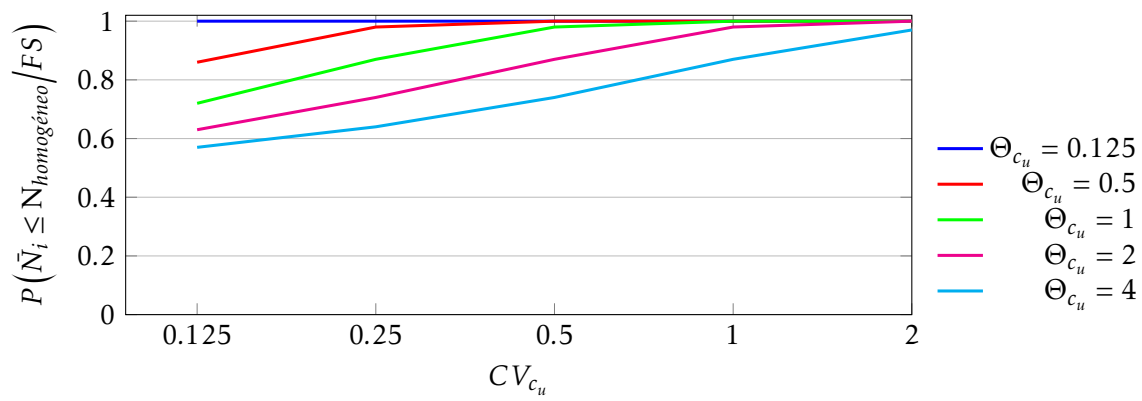


Figura C.18: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

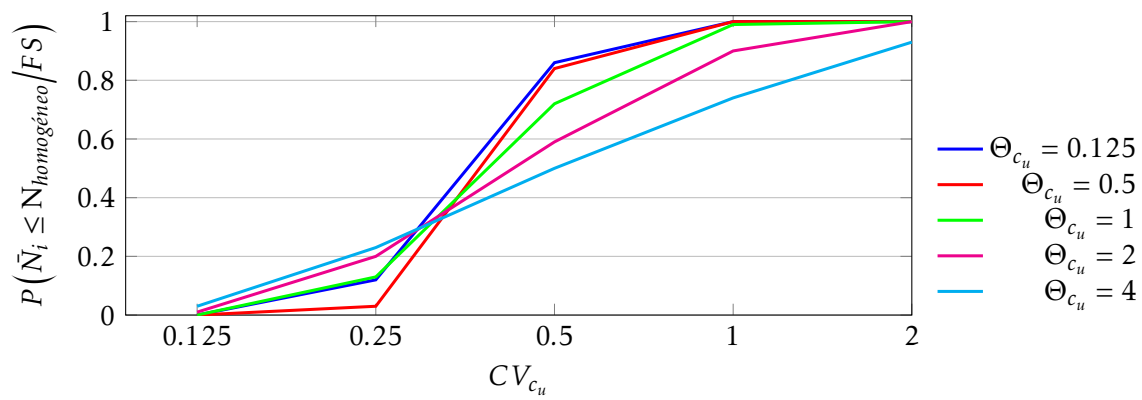


Figura C.19: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

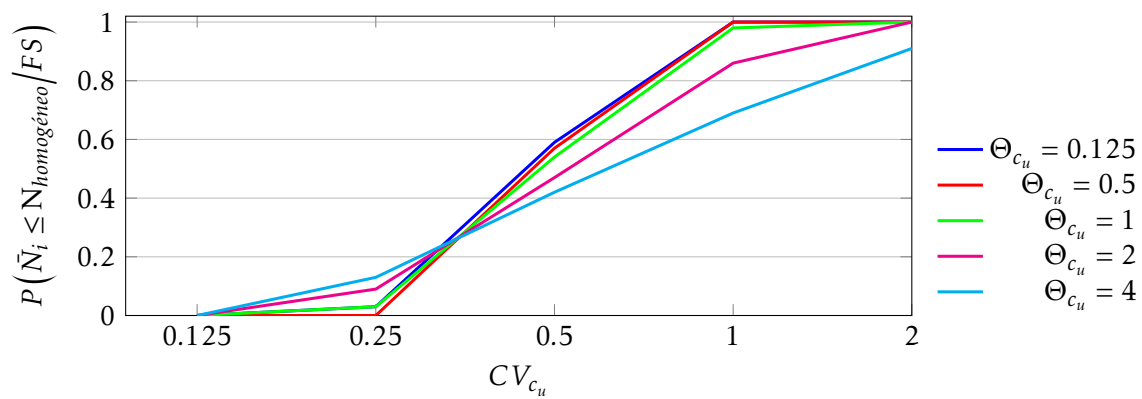


Figura C.20: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

C/D=3

C.2.0.5 $\gamma D/c_u = 0$

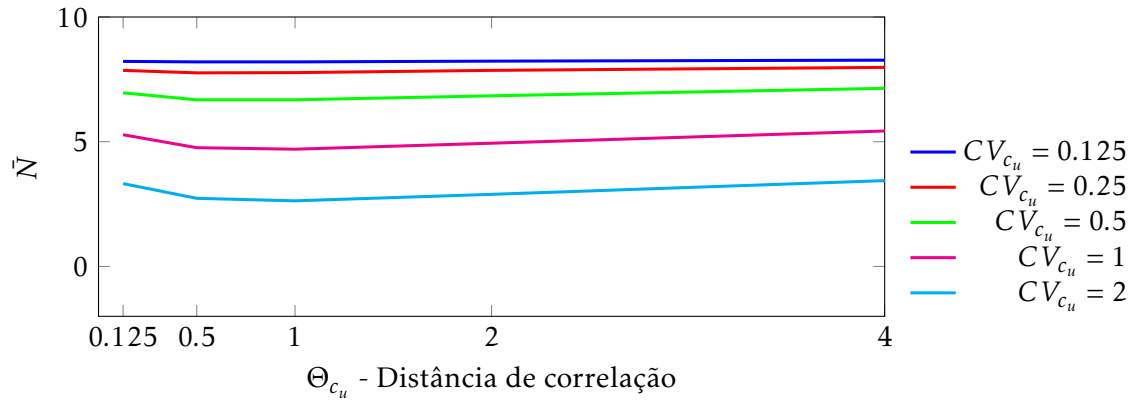


Figura C.21: Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125;0,5;1;2\}$

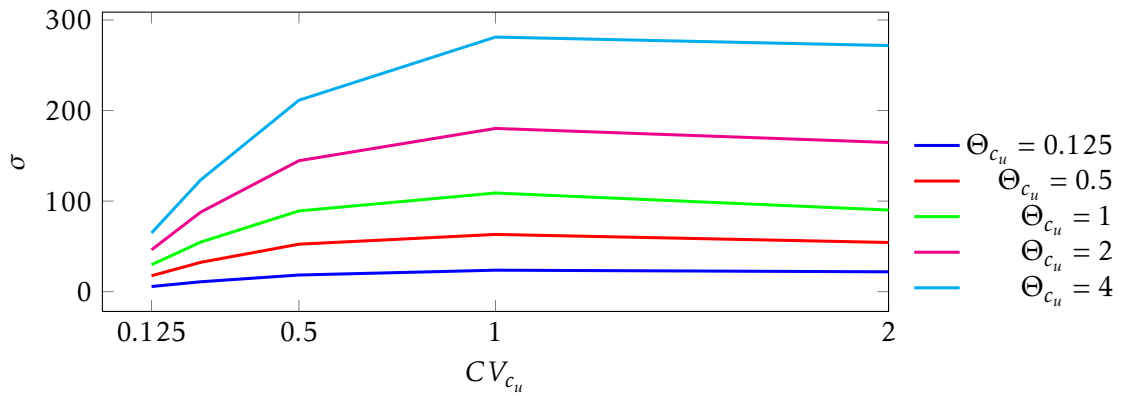


Figura C.22: Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125;0,5;1;2\}$

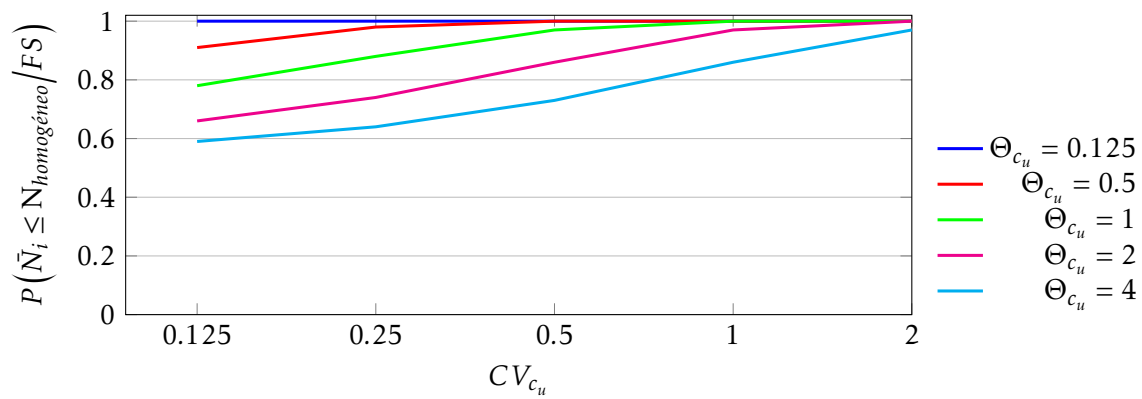


Figura C.23: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

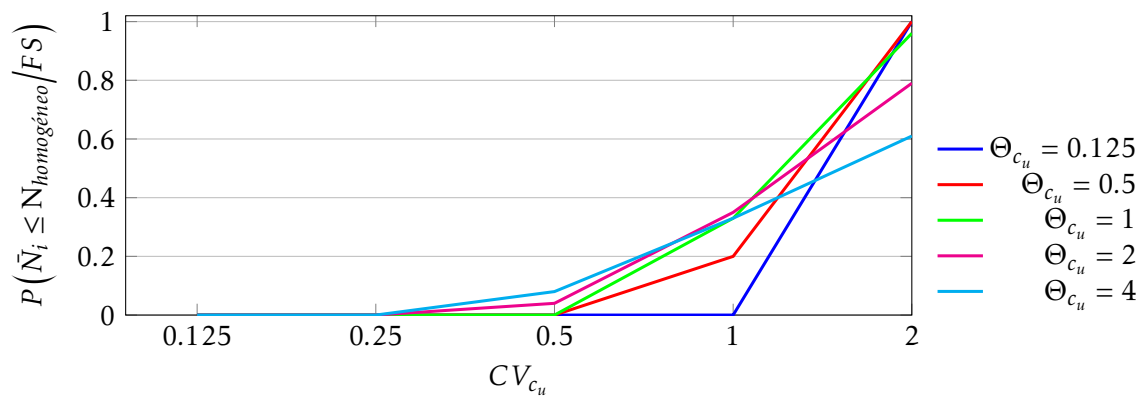


Figura C.24: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

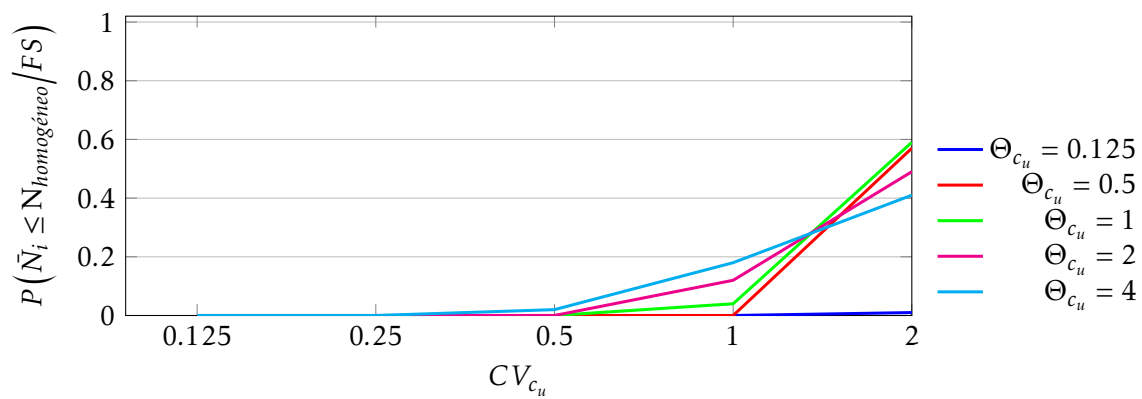


Figura C.25: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

C.2.0.6 $\gamma D/c_u = 1$

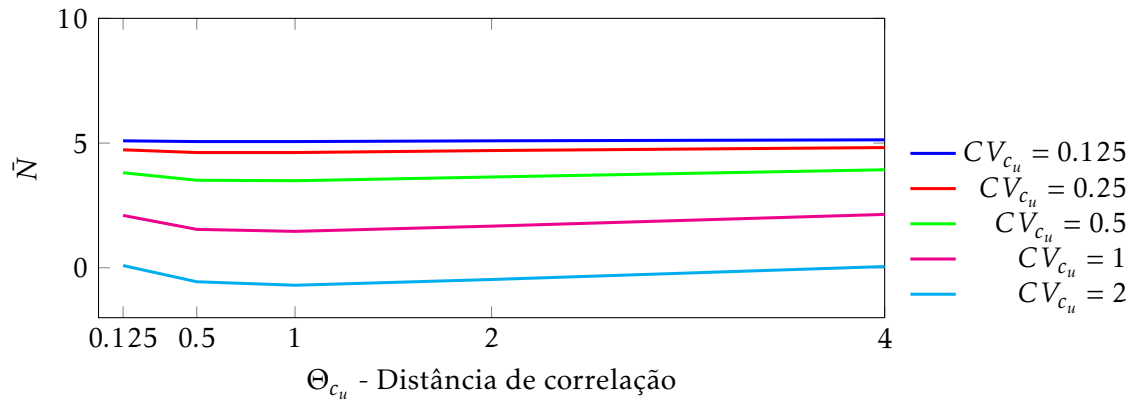


Figura C.26: Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

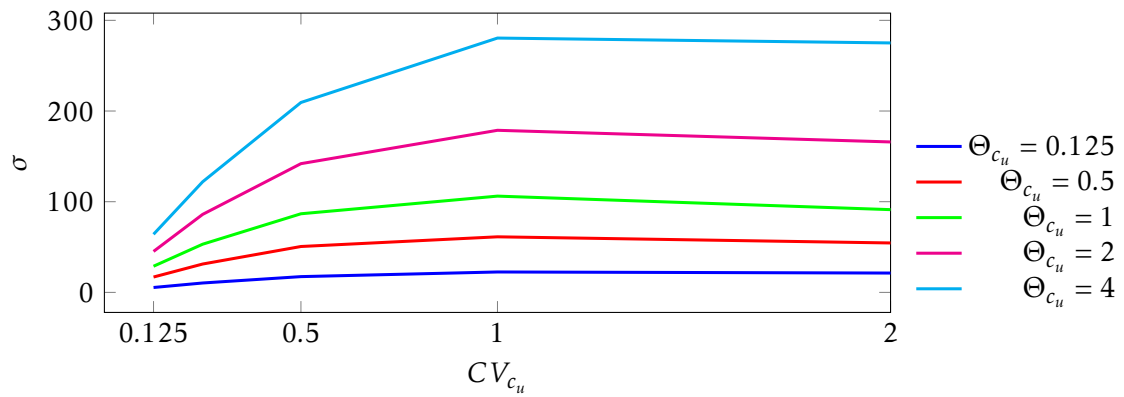


Figura C.27: Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

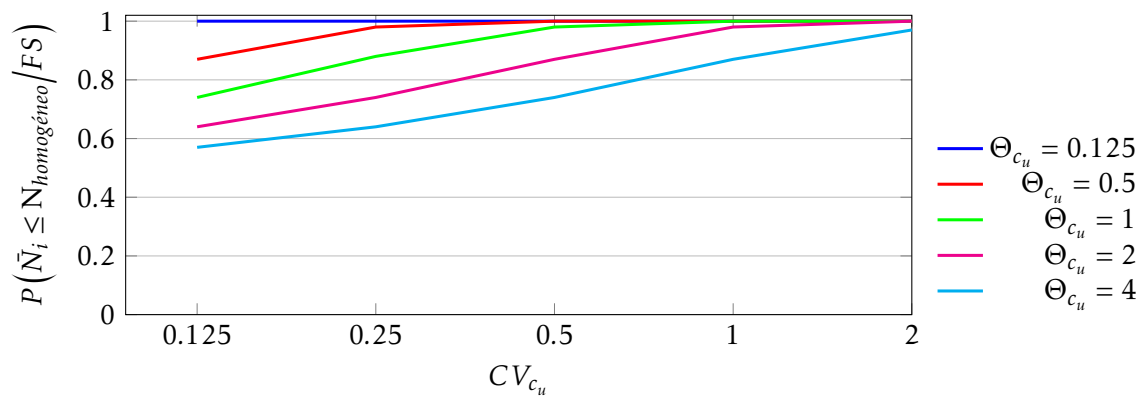


Figura C.28: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

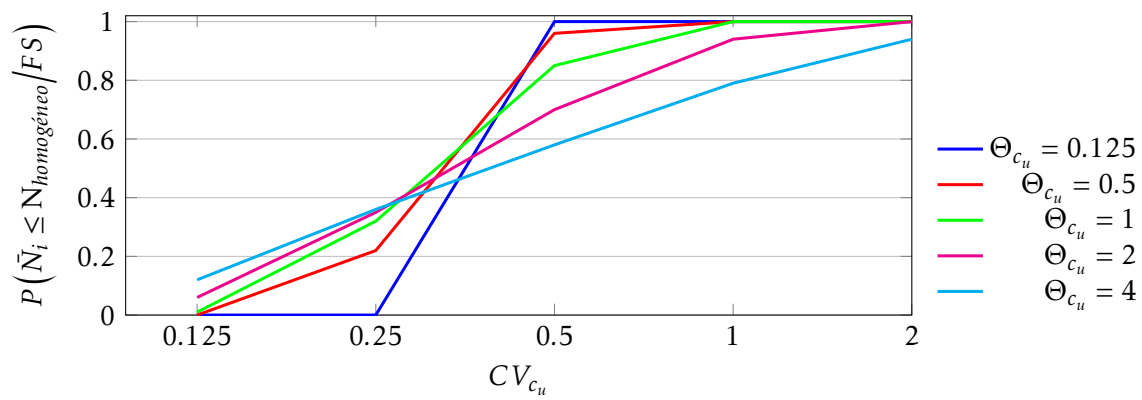


Figura C.29: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

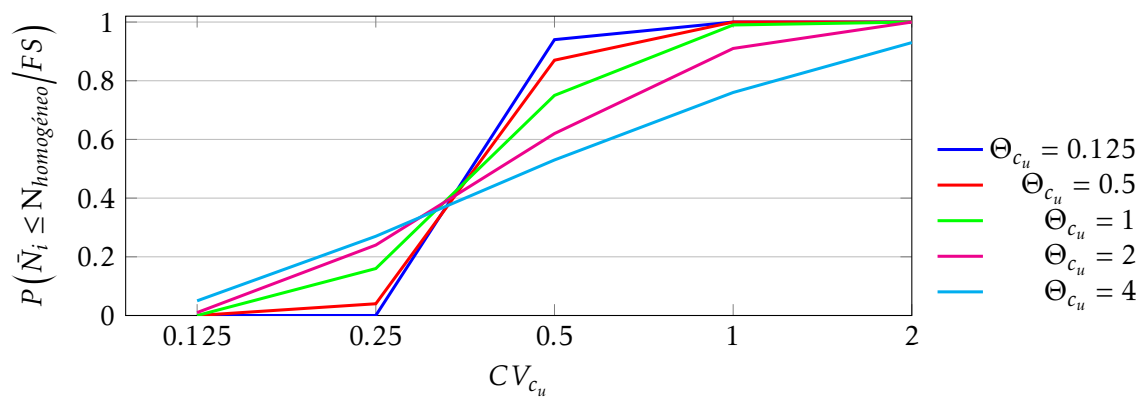


Figura C.30: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

C/D=4

C.2.0.7 $\gamma D/c_u = 0$

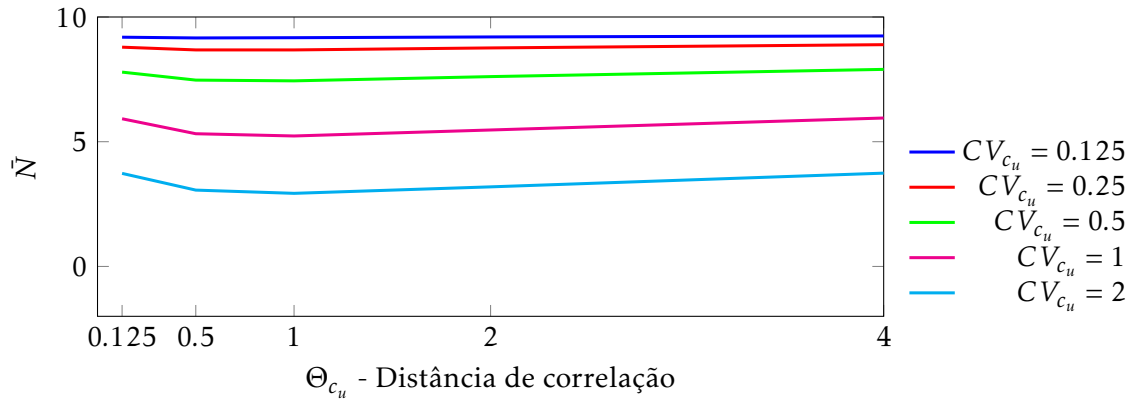


Figura C.31: Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

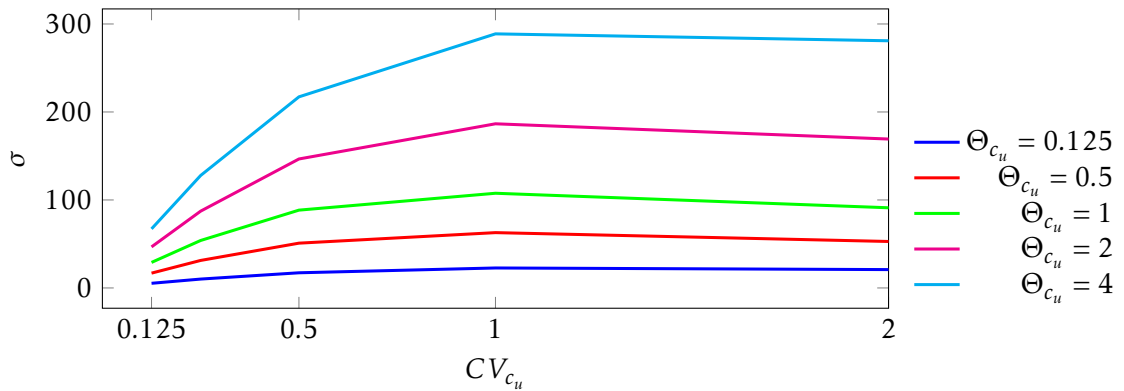


Figura C.32: Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2\}$

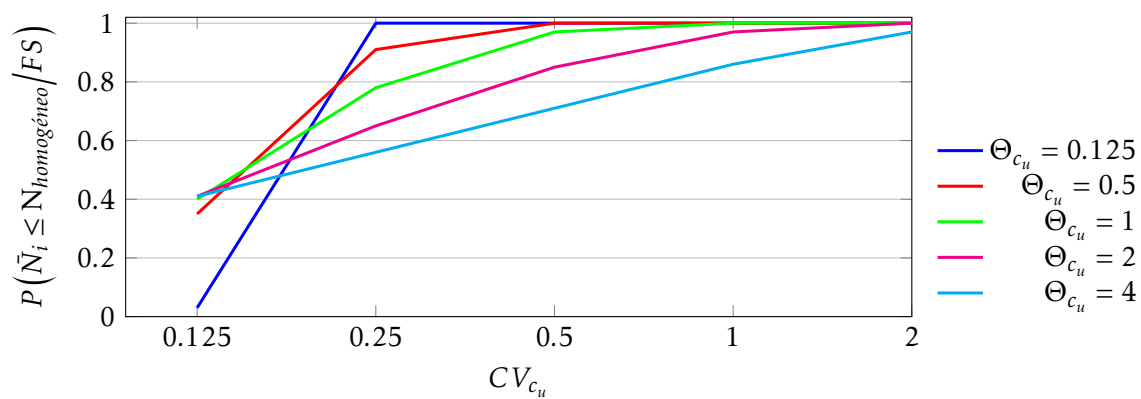


Figura C.33: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homogeneous}/1)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$

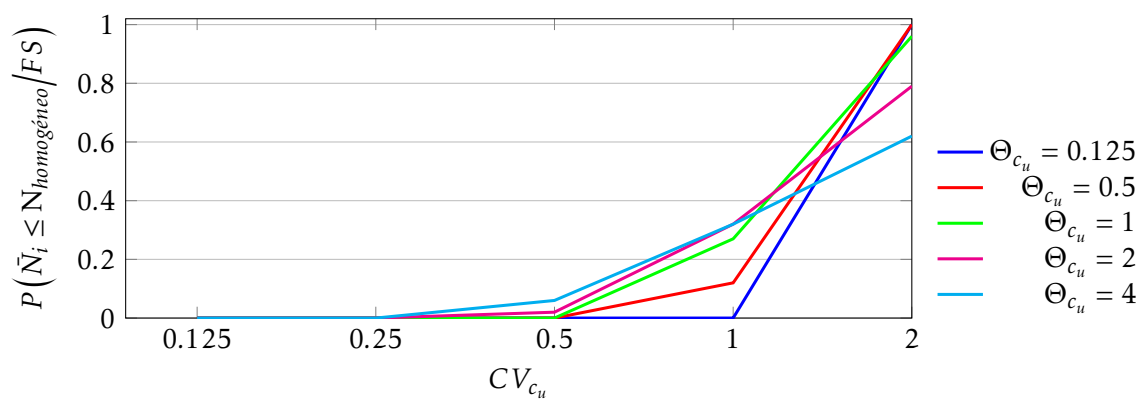


Figura C.34: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homogeneous}/2)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$

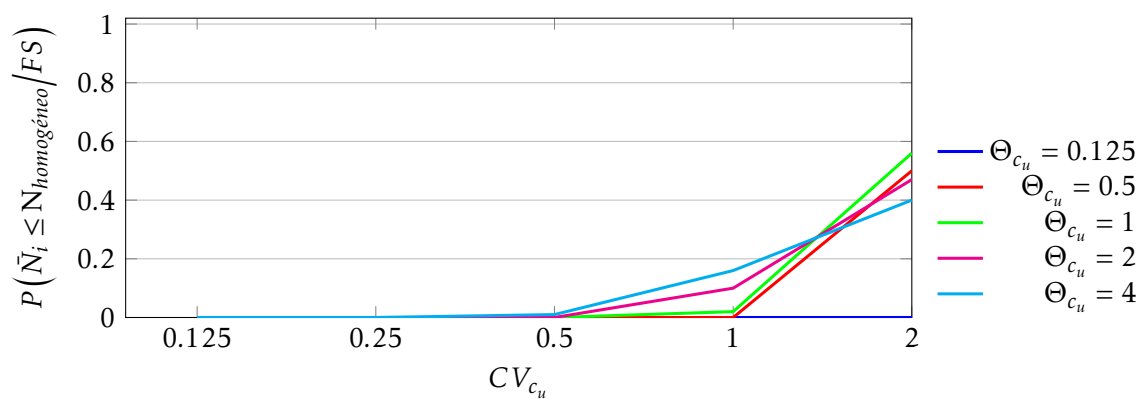


Figura C.35: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homogeneous}/3)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$, $CV_{c_u} = \{0, 125; 0, 25; 0, 5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0, 125; 0, 5; 1; 2; 4\}$

C.2.0.8 $\gamma D/c_u = 1$

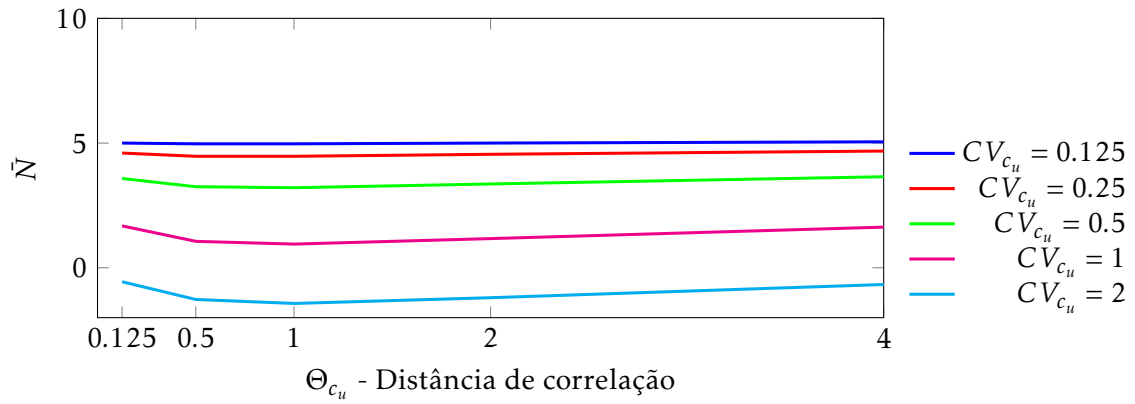


Figura C.36: Evolução dos valores médios do número de estabilidade para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125;0,5;1;2\}$

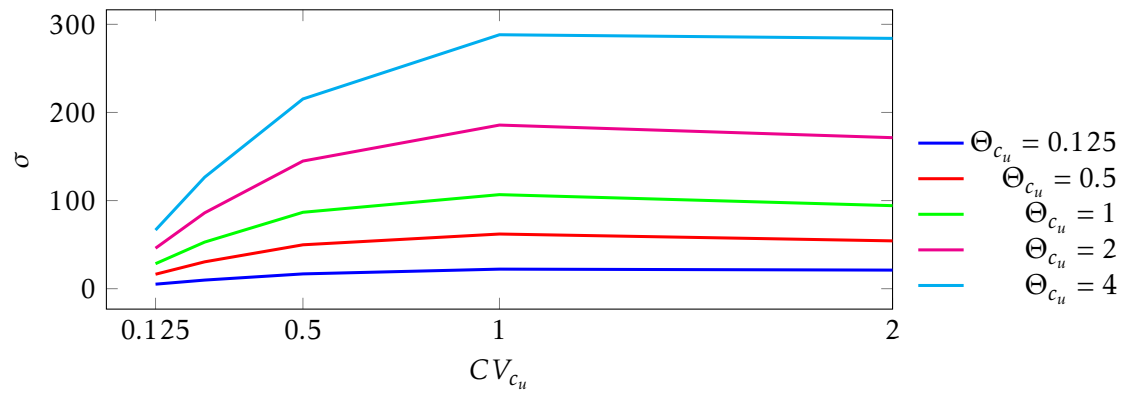


Figura C.37: Evolução dos valores do desvio-padrão para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125;0,25;0,5;1;2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125;0,5;1;2\}$

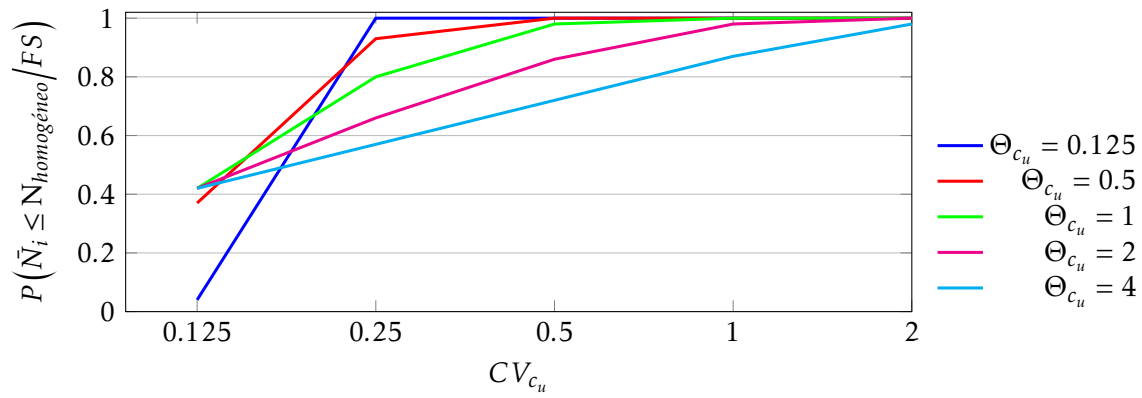


Figura C.38: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/1)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

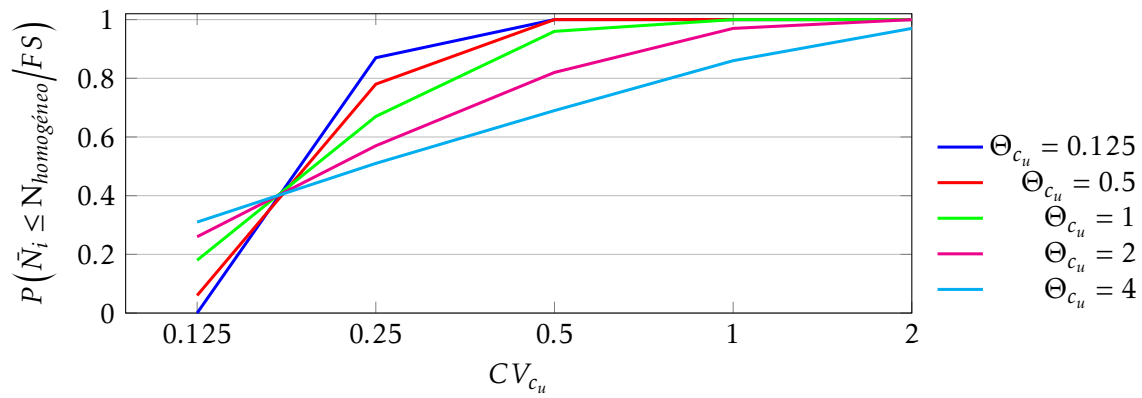


Figura C.39: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/2)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

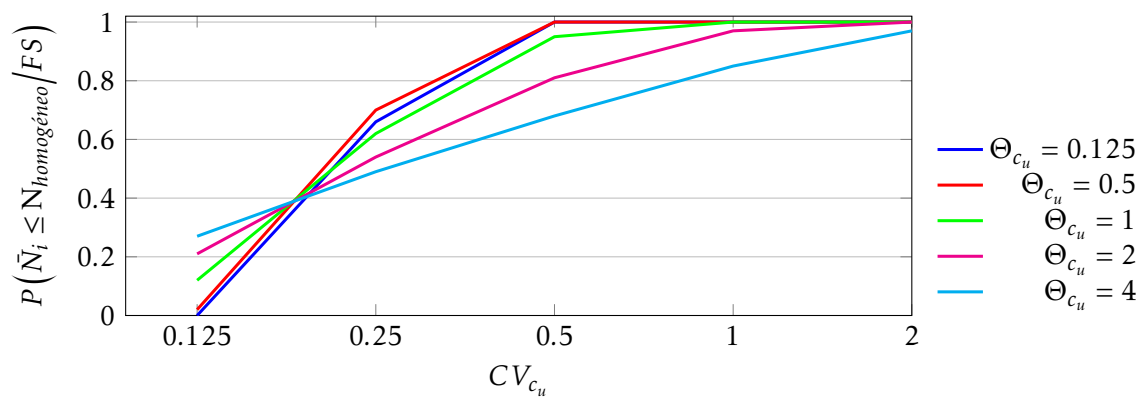


Figura C.40: Probabilidade de \tilde{N}_i ser menor que $(N_{homog\acute{e}neo}/3)$ para $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 1$, $CV_{c_u} = \{0,125; 0,25; 0,5; 1; 2\}$ e $\Theta_{c_u} = \{0,125; 0,5; 1; 2; 4\}$

C.3 Visualização da distribuição das propriedades de resistência e do mecanismo de colapso

$C/D=1$

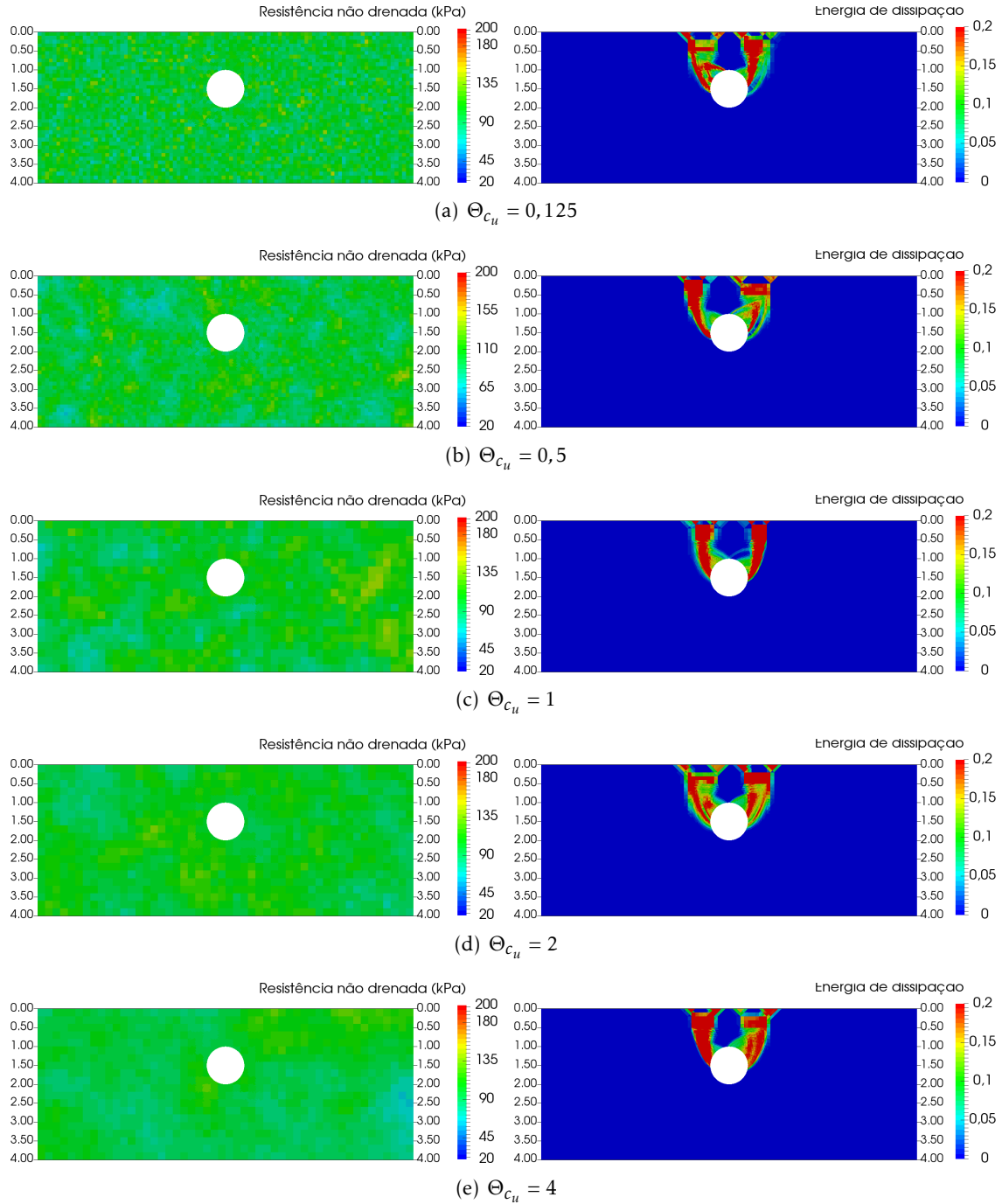


Figura C.41: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,125$

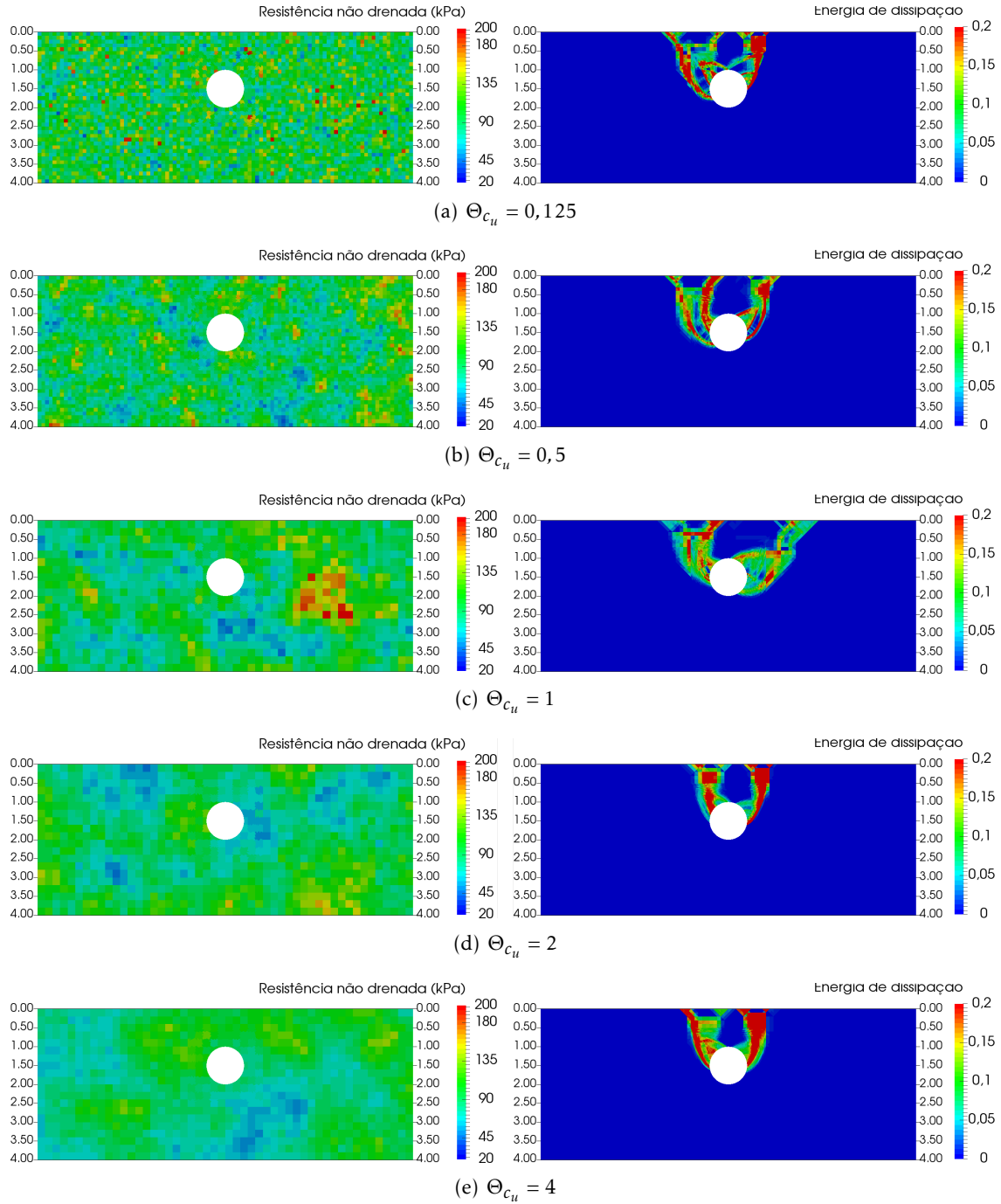


Figura C.42: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,25$

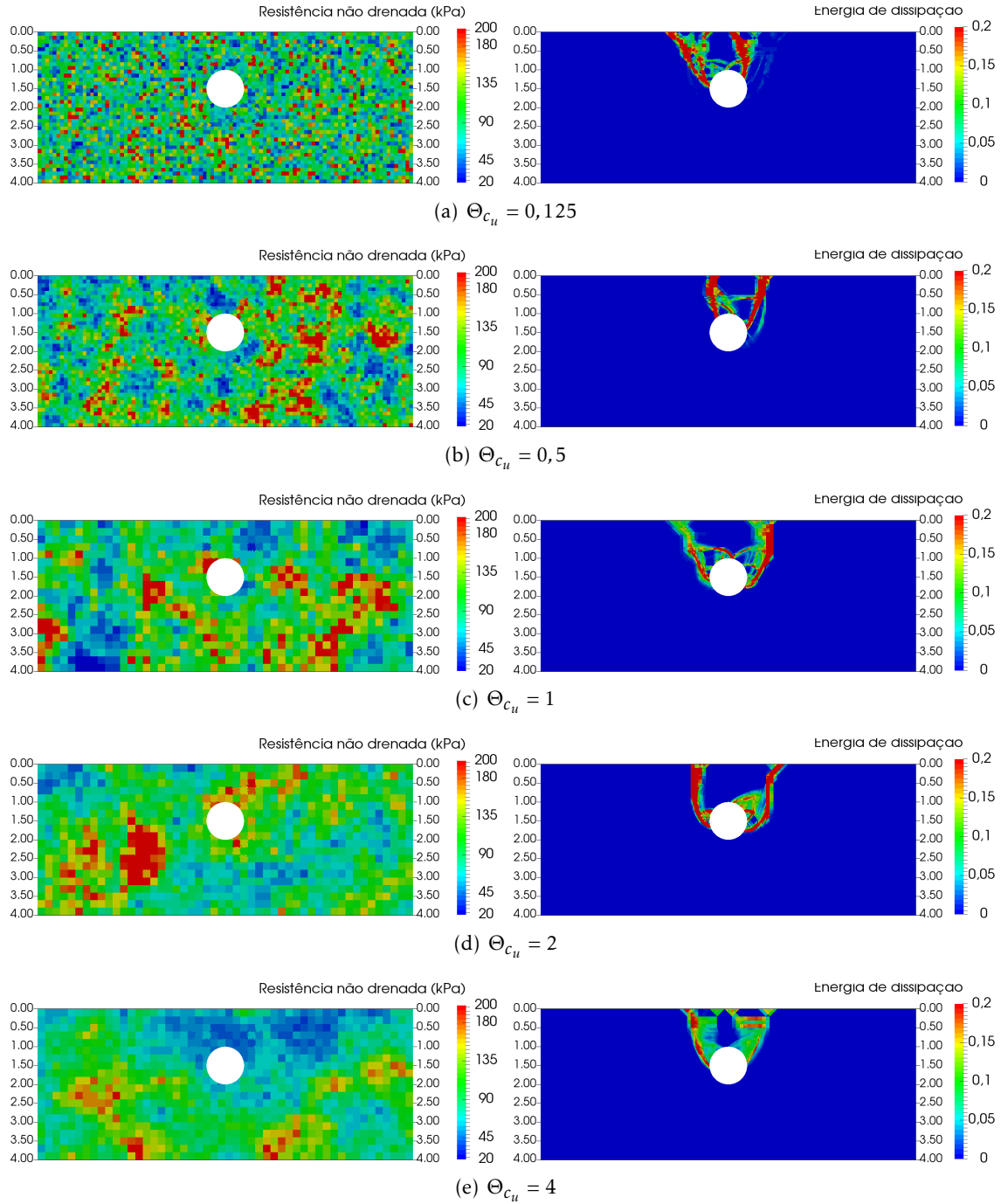


Figura C.43: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,5$

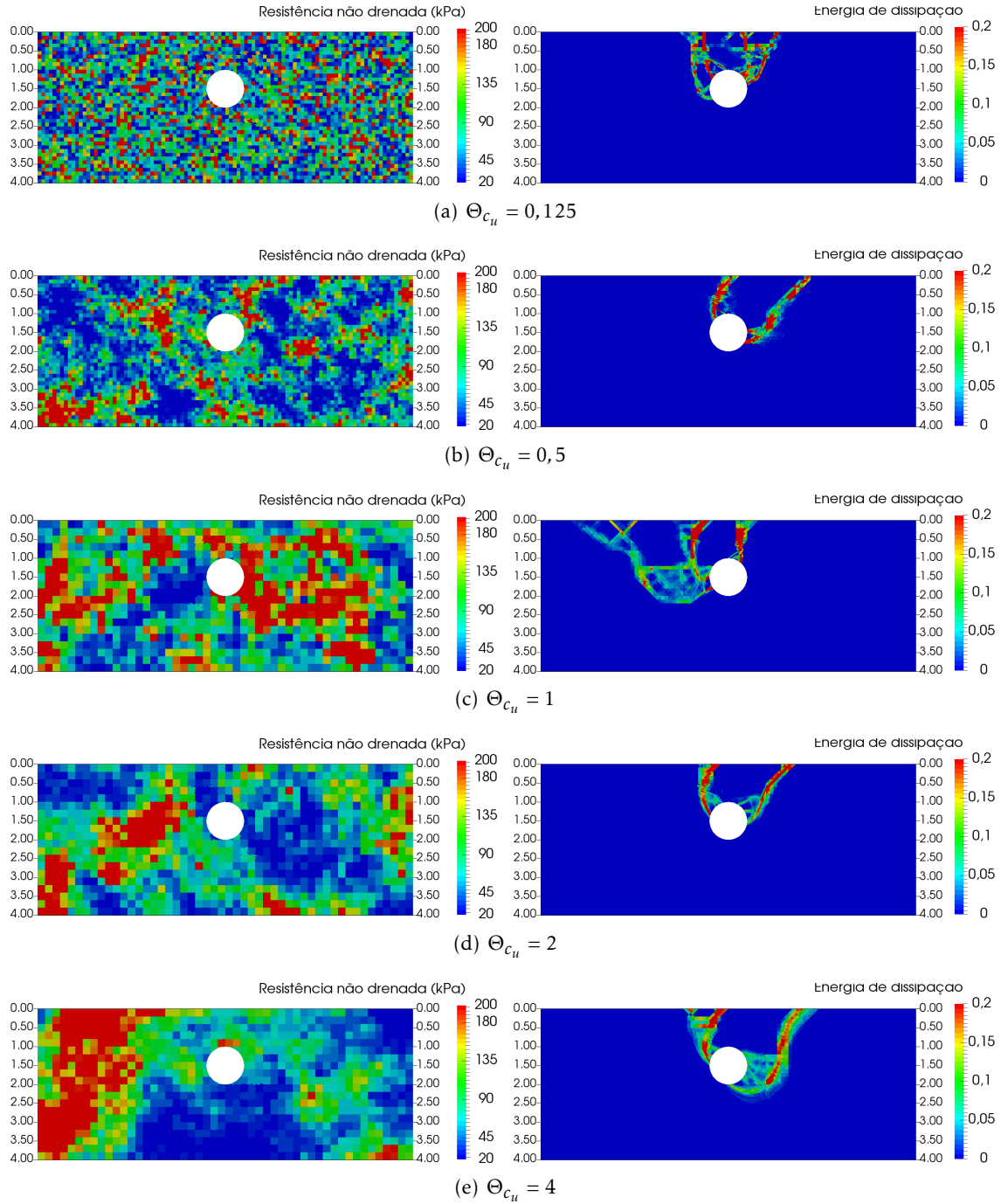


Figura C.44: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 1$

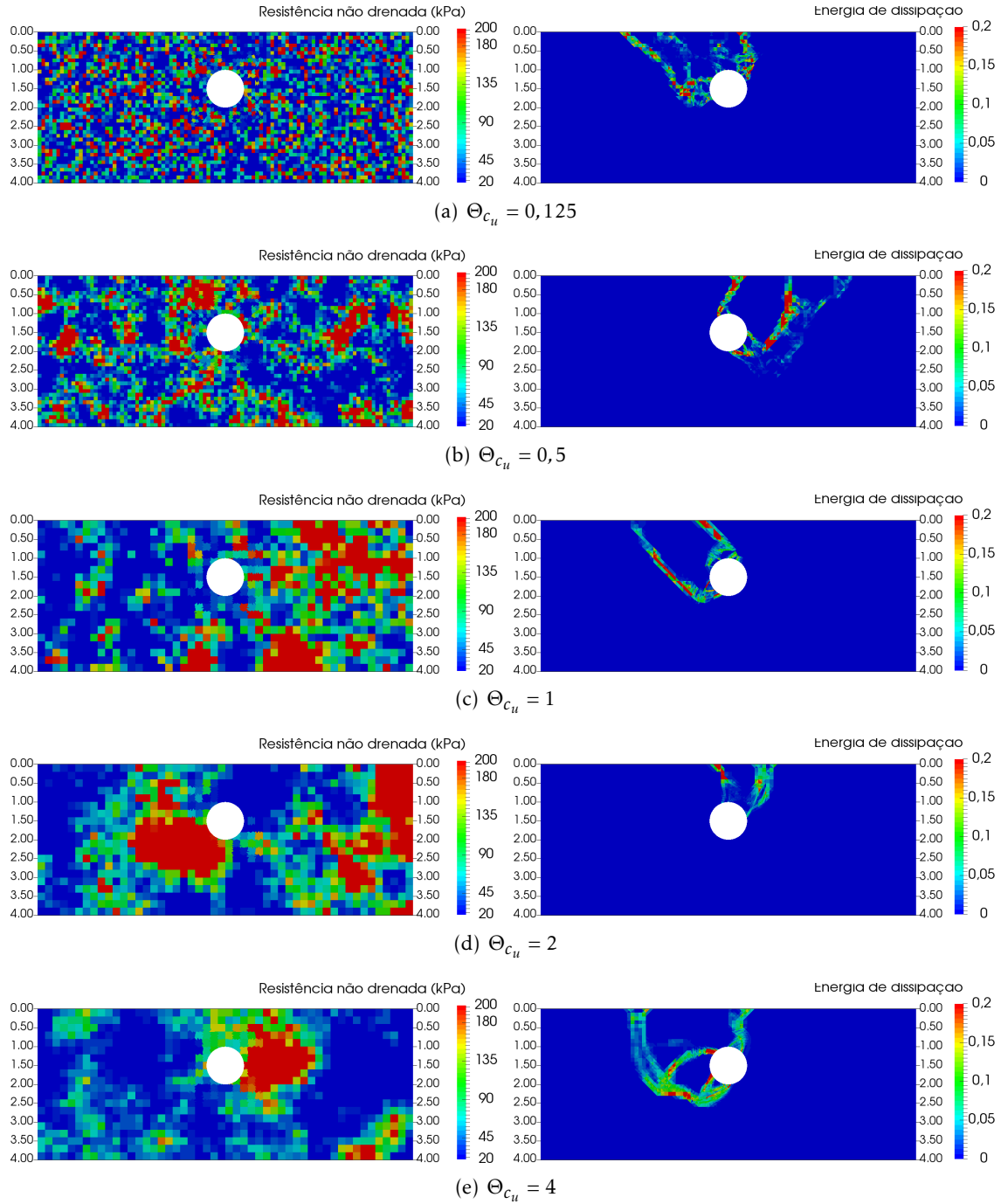


Figura C.45: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 1$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 2$

C.3. VISUALIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DAS PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E DO MECANISMO DE COLAPSO

C/D=2

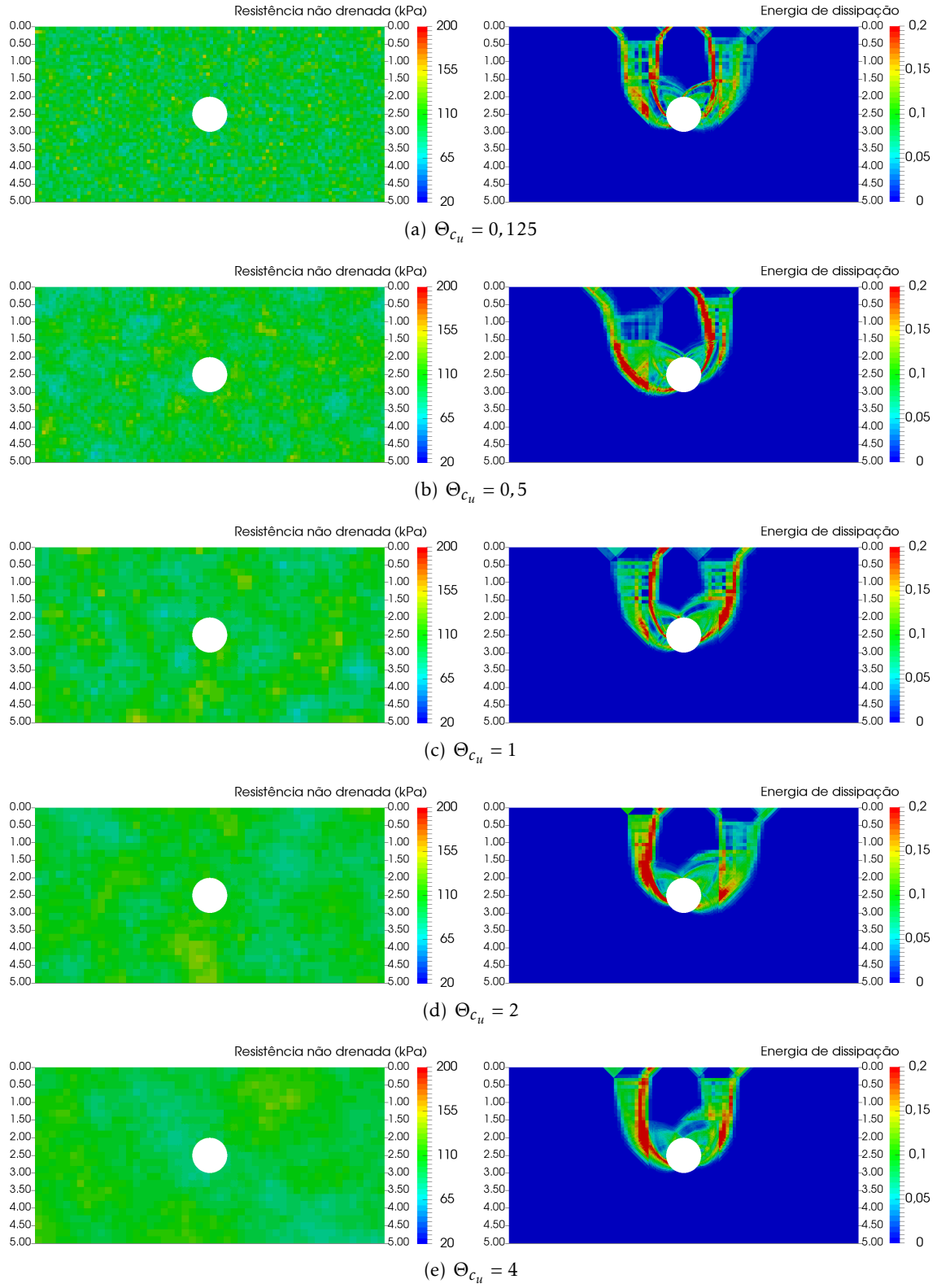


Figura C.46: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,125$

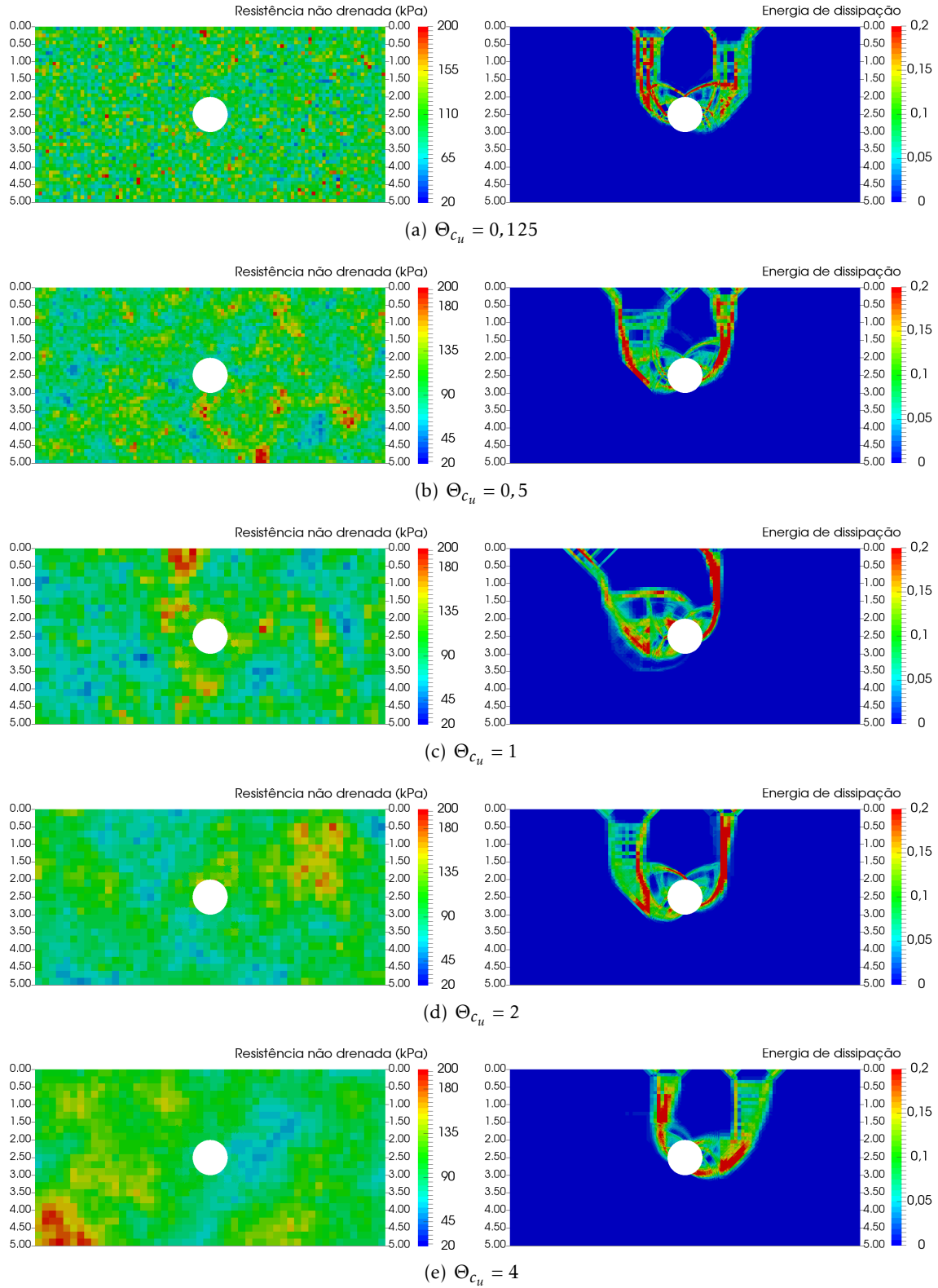


Figura C.47: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,25$

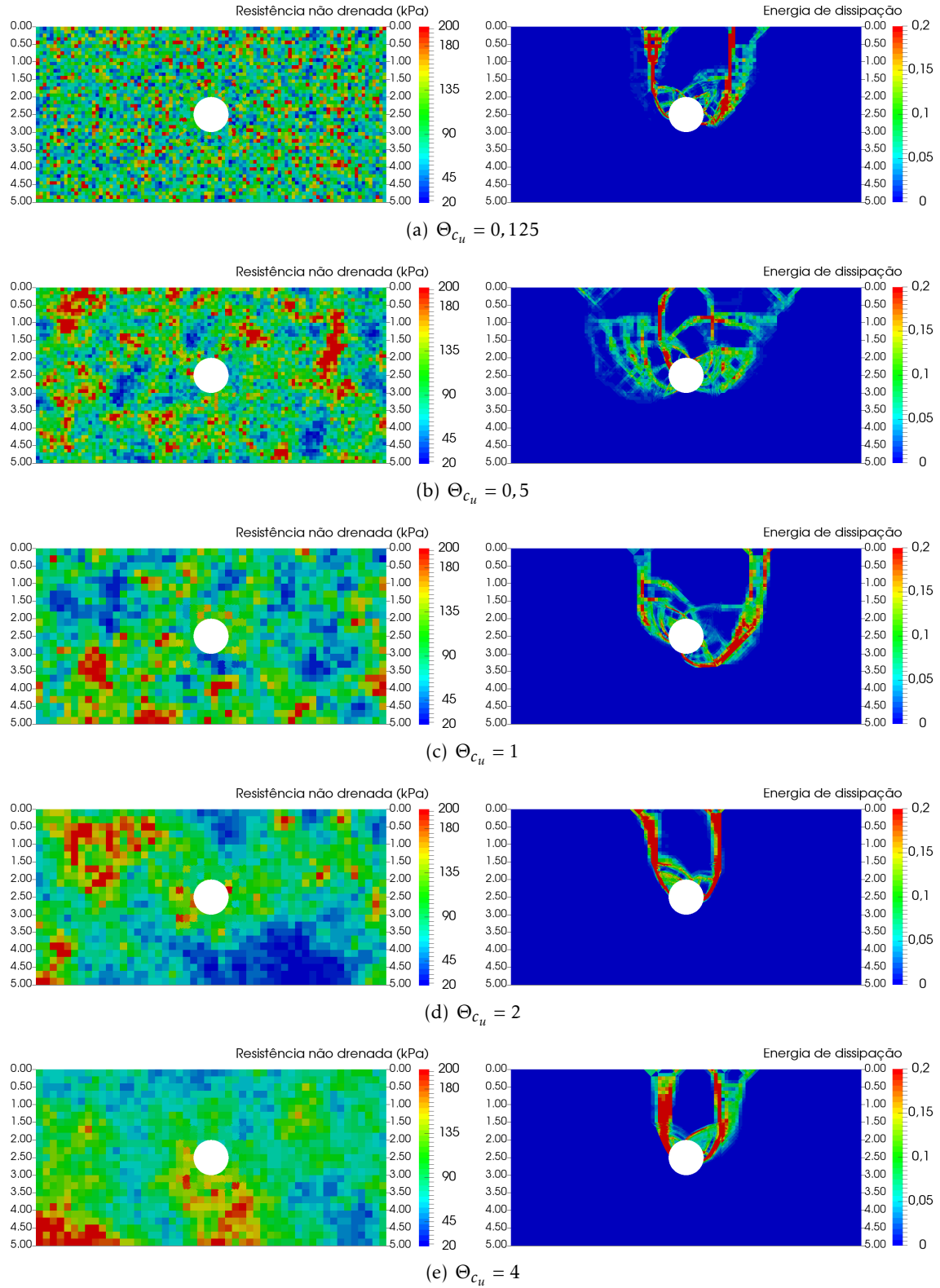


Figura C.48: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,5$

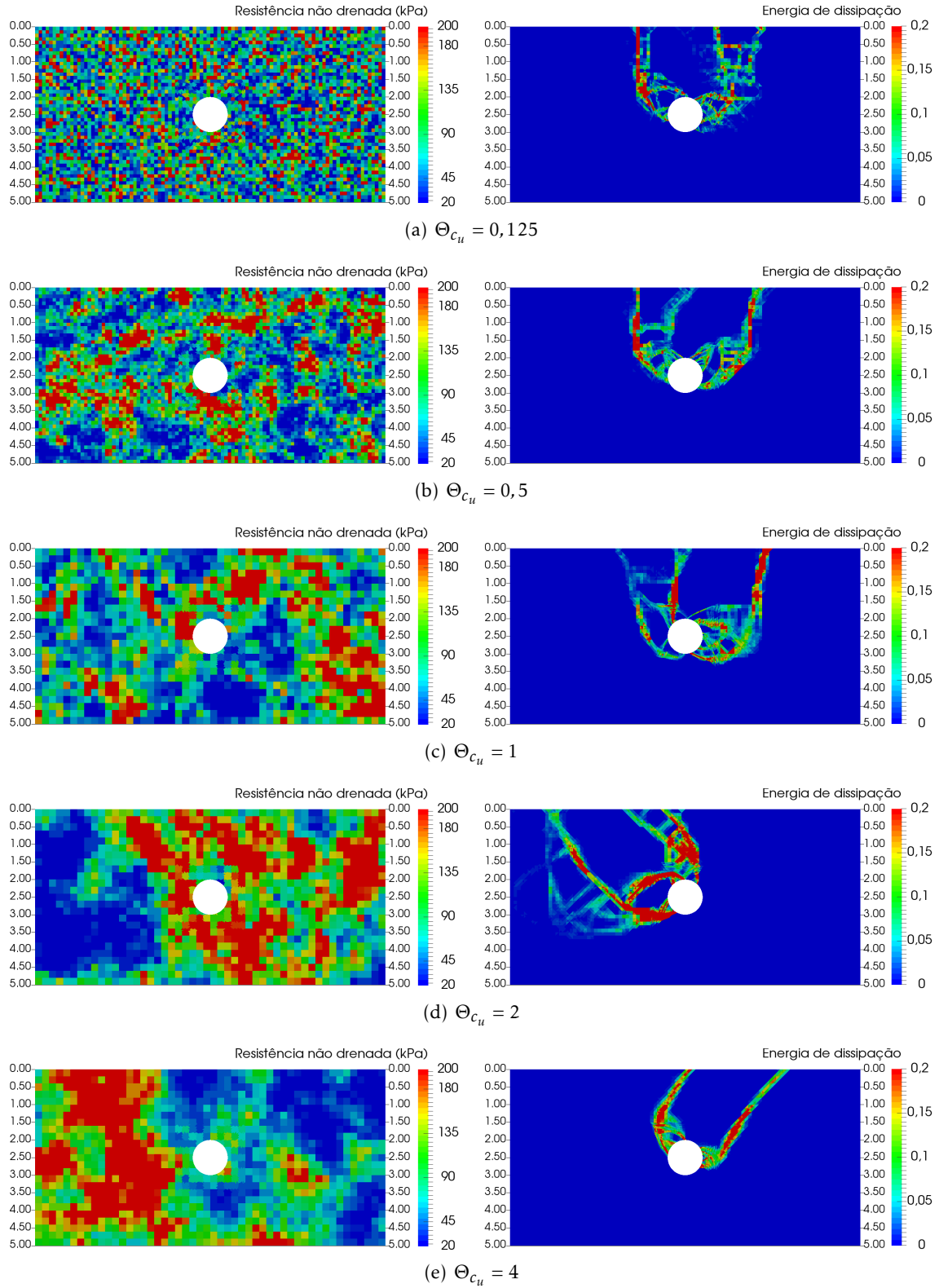


Figura C.49: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 1$

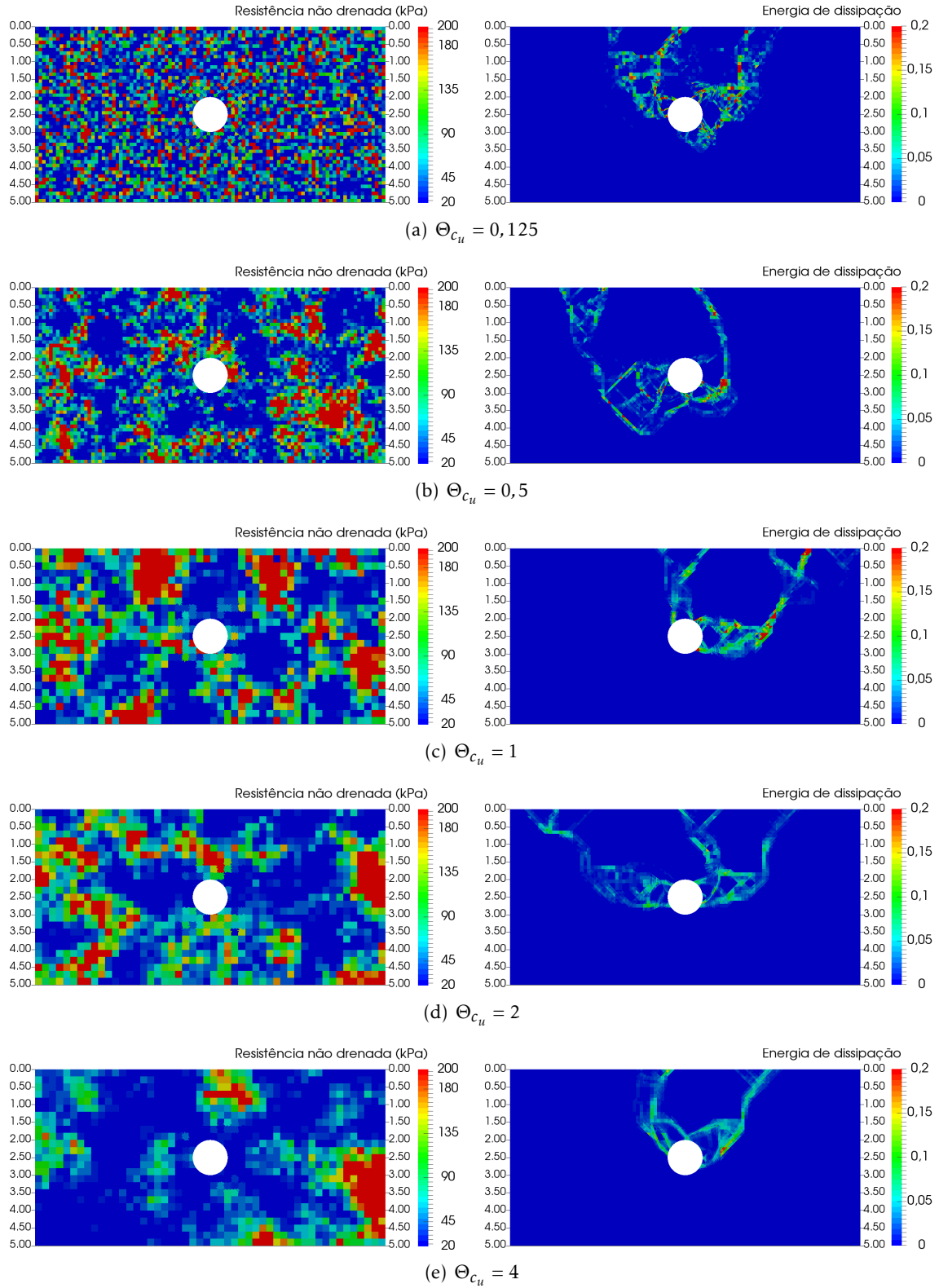


Figura C.50: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 2$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 2$

C.3. VISUALIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DAS PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E DO MECANISMO DE COLAPSO

C/D=3

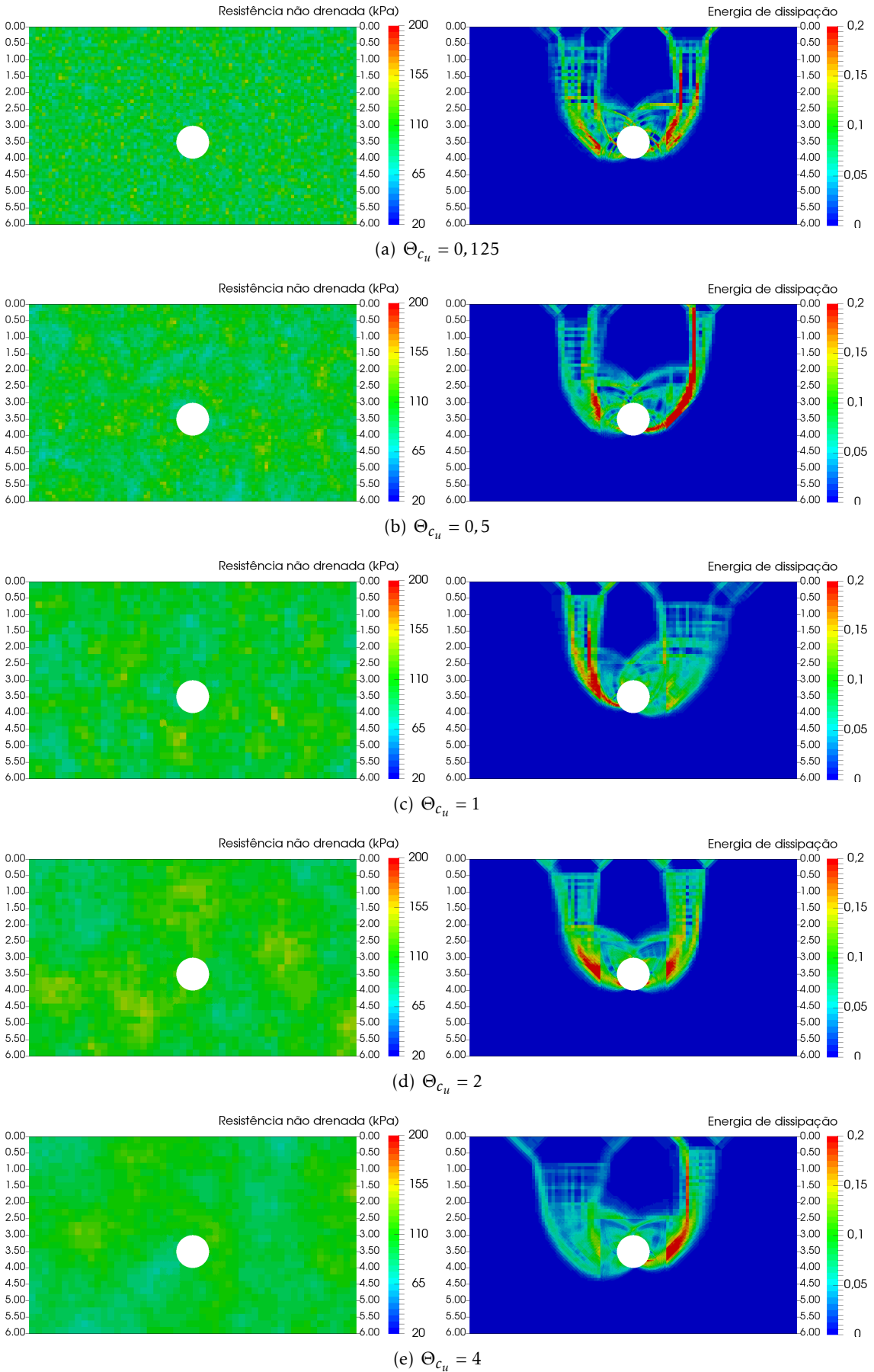


Figura C.51: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,125$

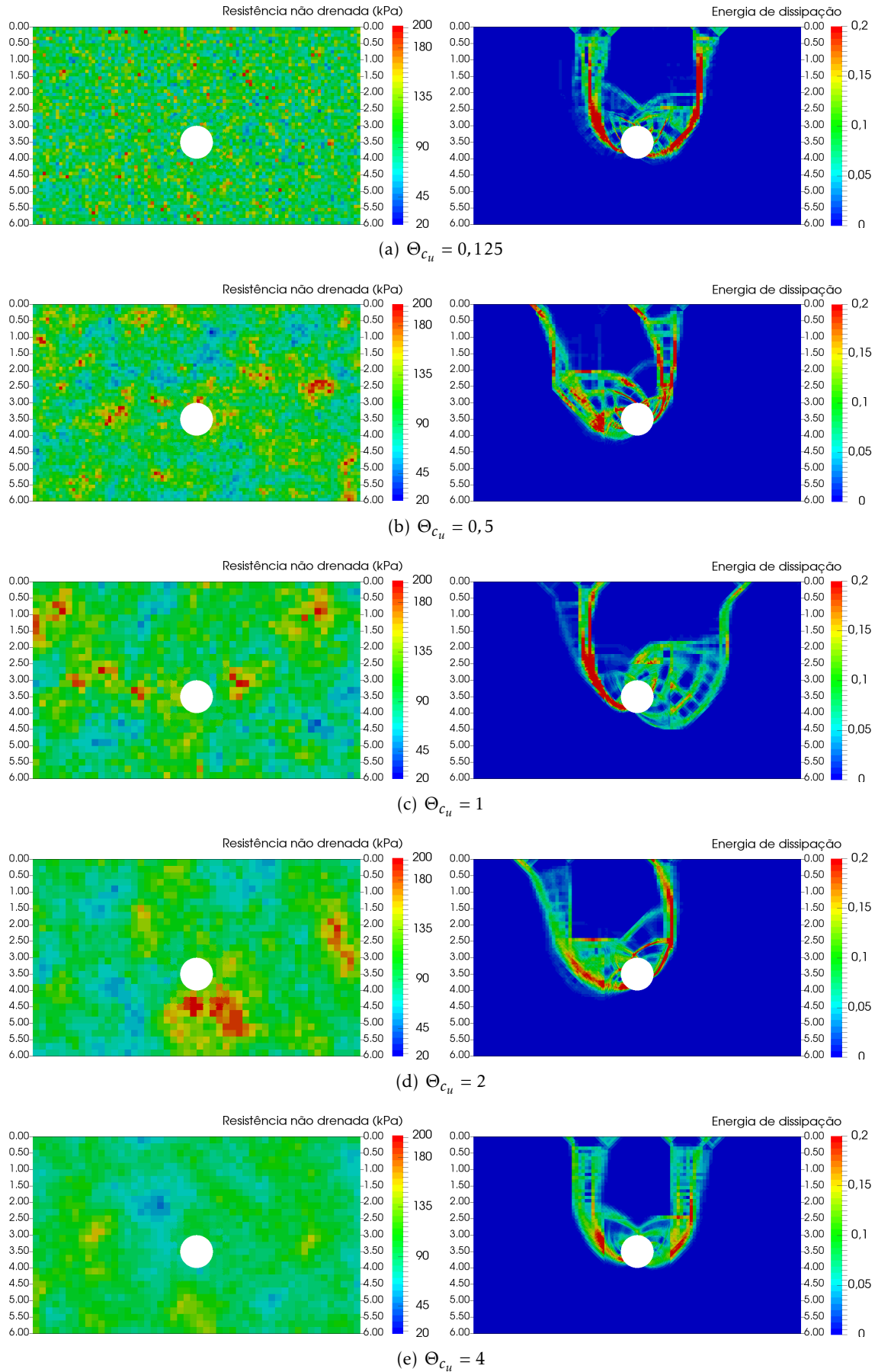


Figura C.52: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,25$

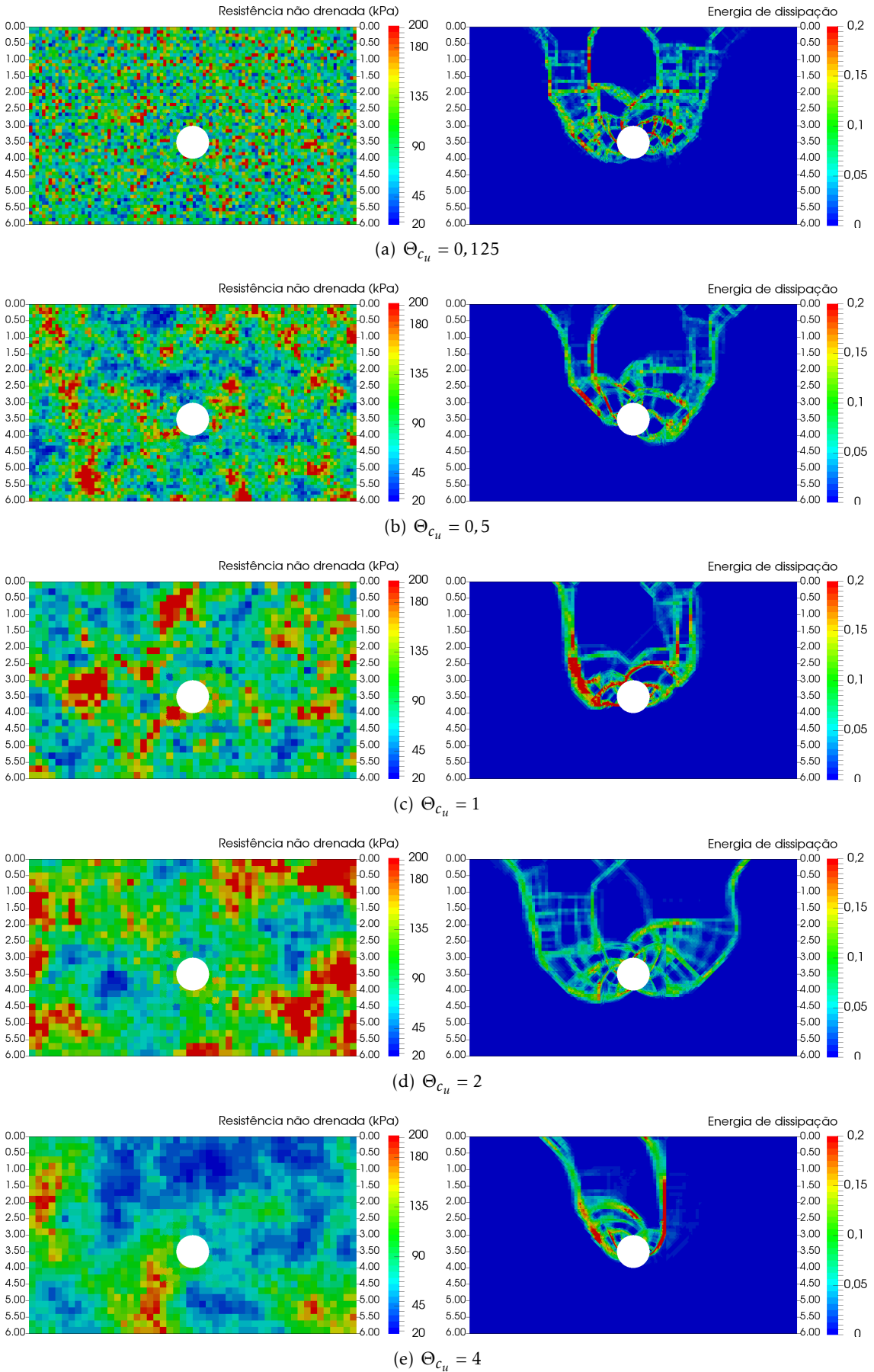


Figura C.53: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,5$

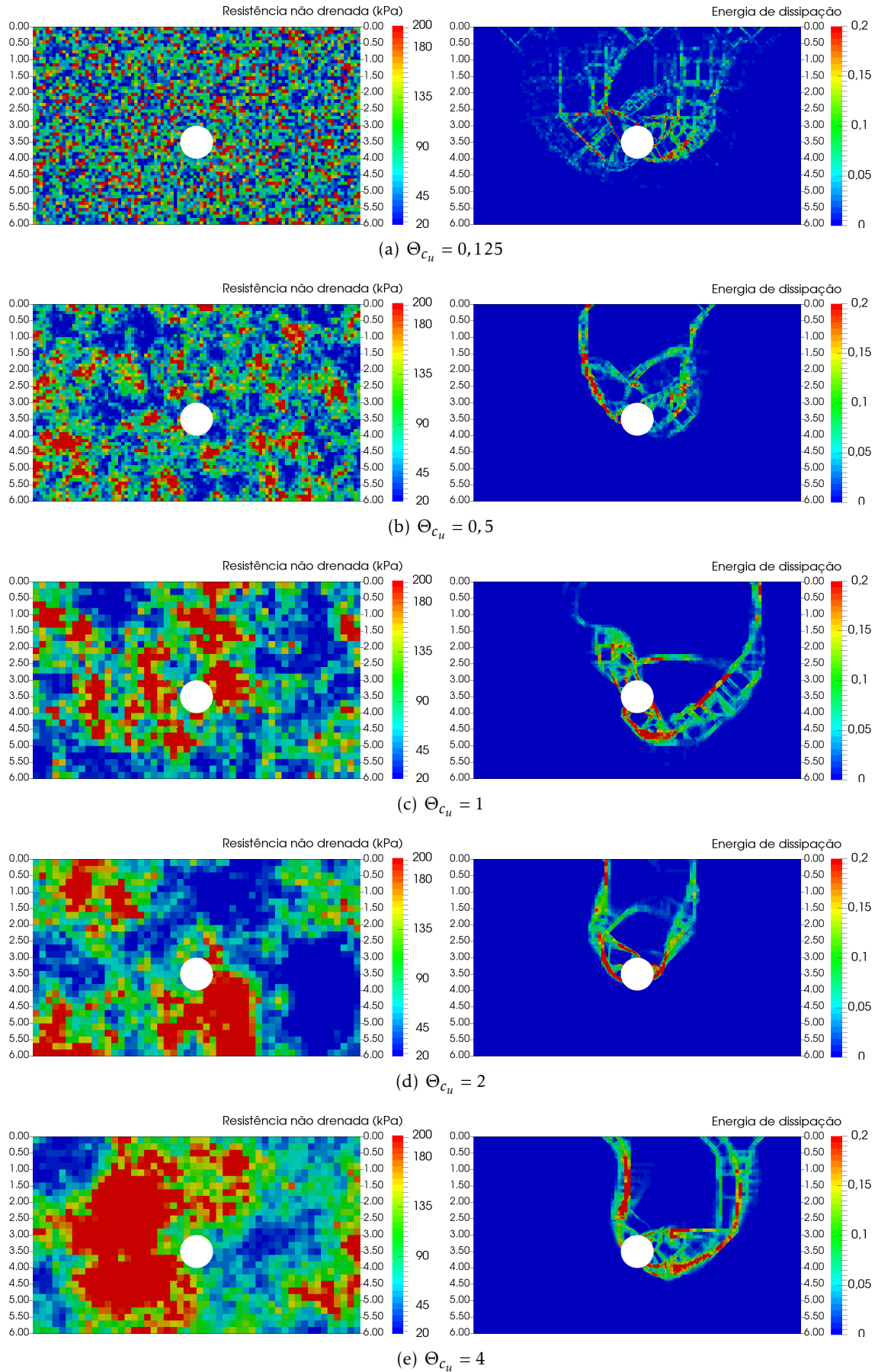


Figura C.54: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 1$

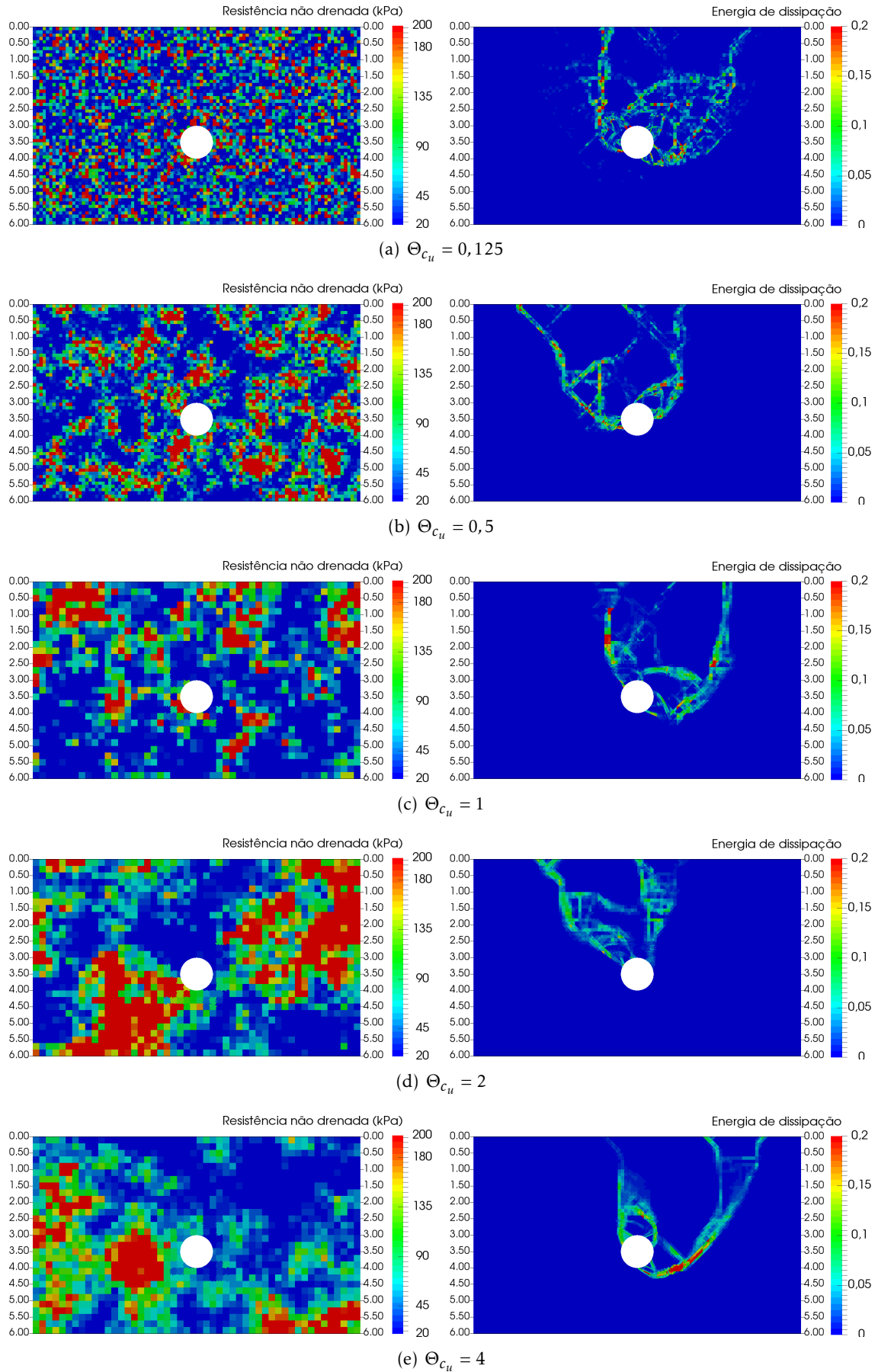


Figura C.55: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 3$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 2$

C.3. VISUALIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DAS PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E DO MECANISMO DE COLAPSO

C/D=4

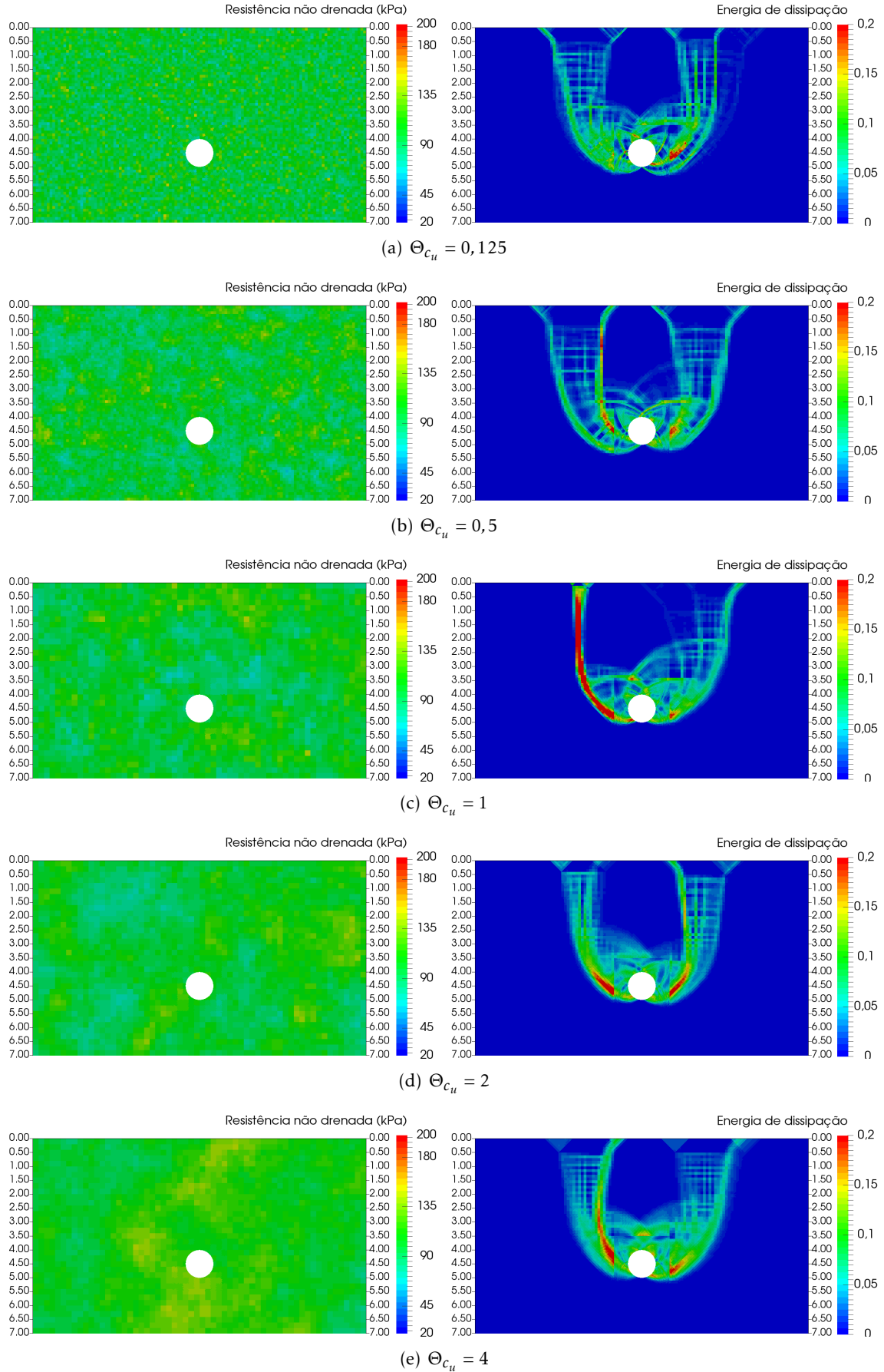


Figura C.56: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respetivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,125$

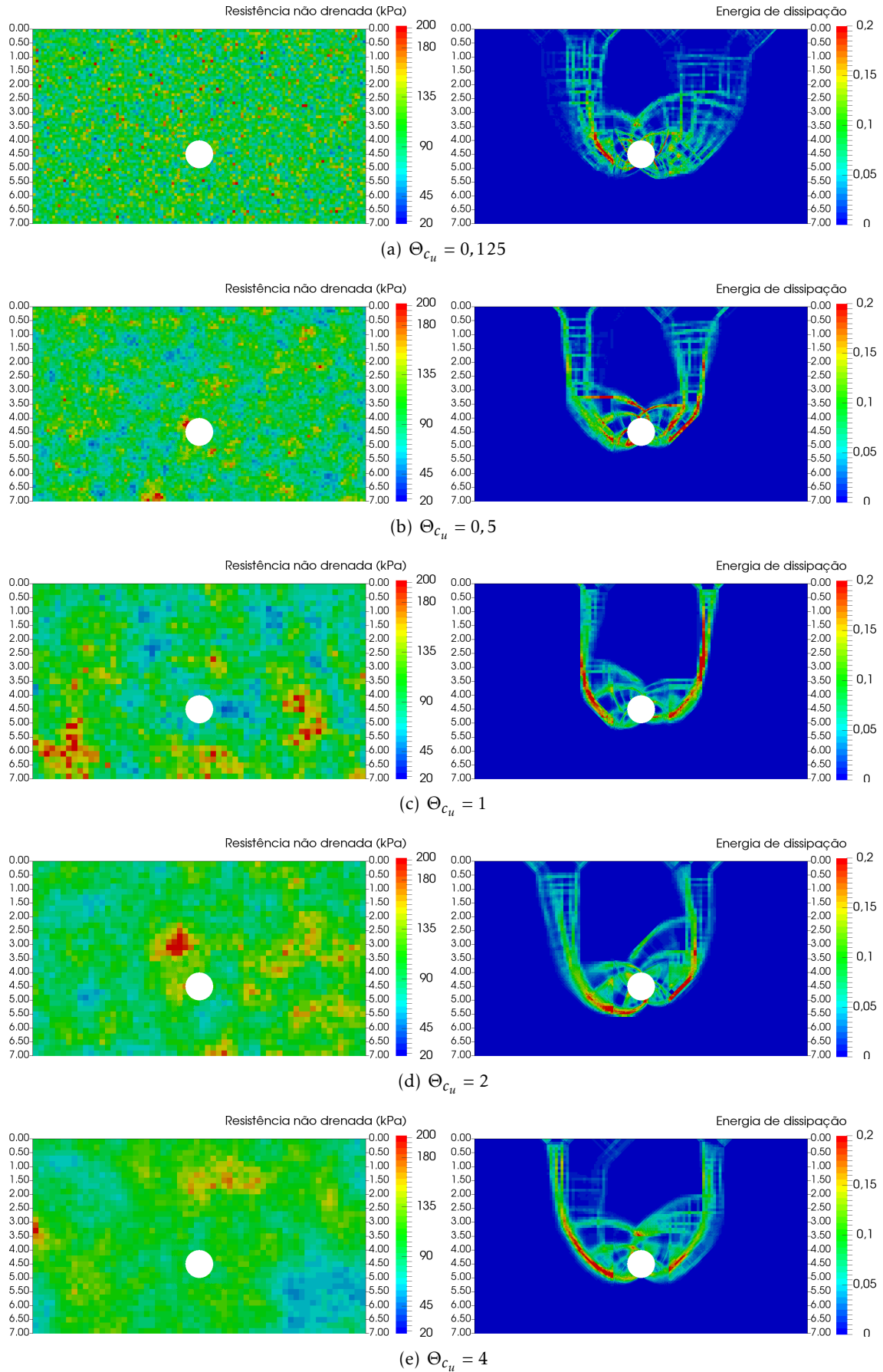


Figura C.57: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,25$

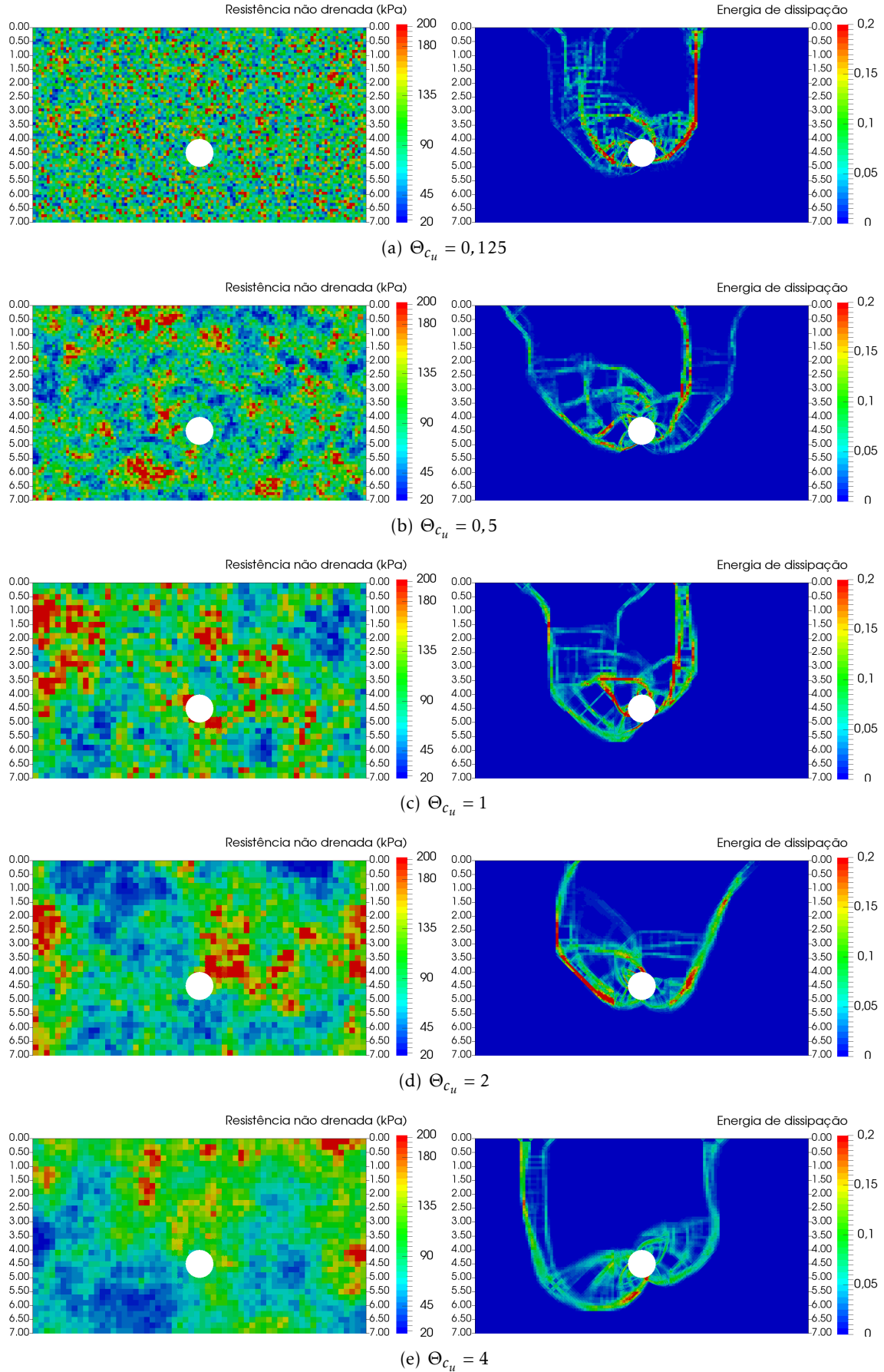


Figura C.58: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 0,5$

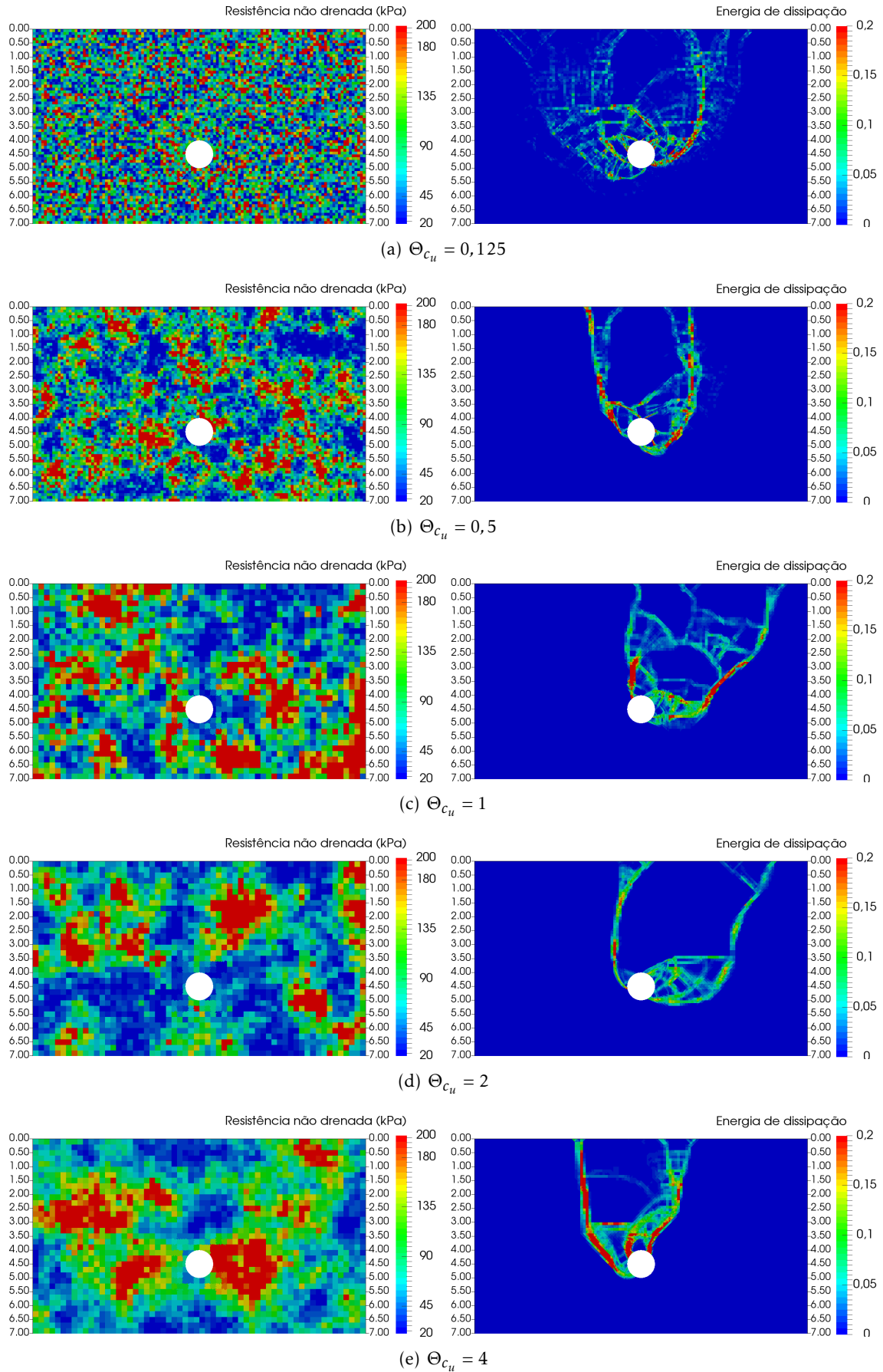


Figura C.59: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 1$

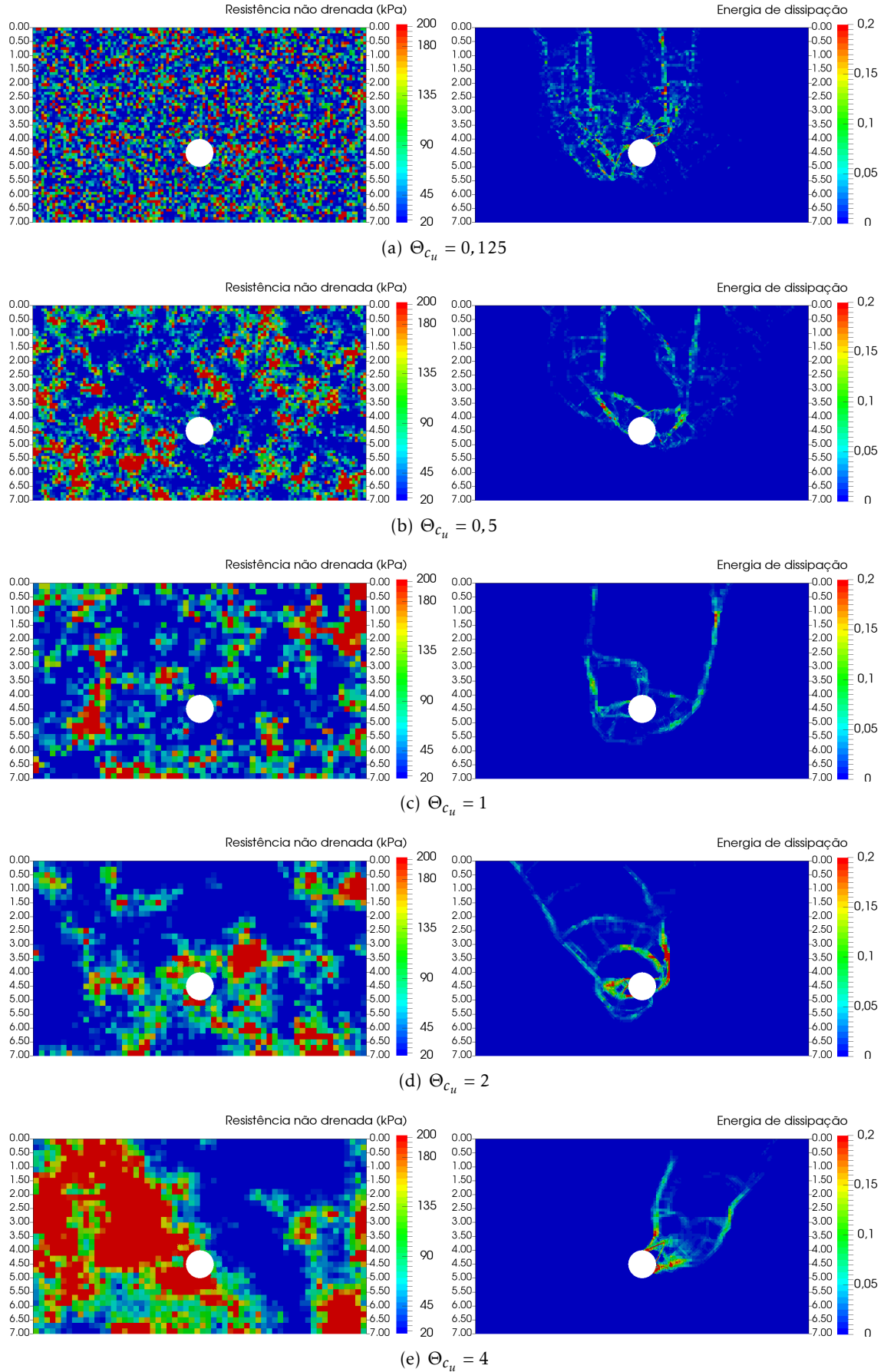


Figura C.60: Exemplo de distribuição da resistência ao corte não drenada e respectivo mecanismo de colapso para a profundidade $C/D = 4$, $\gamma D/c_u = 0$ e $CV_{c_u} = 2$